ZEITLICHE STRUKTUR DER SPANNUNG BEIM STROMINDUZIERTEN WIDERSTAND VON TYP I SUPRALEITERN

Dissertation
zur Erlangung des Grades eines Doktors
der Naturwissenschaften

der Fakultät für Physik
der Eberhard - Karls - Universität
zu Tübingen

vorgelegt von
Bernhard Mühlemeier
aus Brückenau

1986

UNIV.
LEIDEN
BIBL.

ZEITLICHE STRUKTUR DER SPANNUNG BEIM STROMINDUZIERTEN WIDERSTAND VON TYP I SUPRALEITERN

Dissertation
zur Erlangung des Grades eines Doktors
der Naturwissenschaften

der Fakultät für Physik
der Eberhard - Karls - Universität
zu Tübingen

vorgelegt von
Bernhard Mühlemeier
aus Brückenau

1986

Tag der mündlichen Prüfung: 30.10.1986

Dekan:	Prof.Dr.G.J.Wagner
1.Berichterstatter:	Prof.Dr.R.P.Hübener
2.Berichterstatter:	apl.Prof.Dr.A.Schwenk

Für Hedwig, Richard und Hildegard

Die vorliegende Arbeit entstand am Lehrstuhl für Experimentalphysik II des Physikalischen Instituts der Eberhard-Karls-Universität Tübingen.

Das Zustandekommen einer solchen Arbeit erfordert passende Voraussetzungen sowohl im Arbeits- als auch im Privatbereich. Ich danke daher allen, die es mir ermöglichten, diese Arbeit auszuführen und mich dabei unterstützten.

Mein besonderer Dank gilt

- meinem Betreuer, Herrn Prof. Dr. R.P. Hübener, für seine Unterstützung und Förderung und die dabei eingeräumten Freiräume zur Entwicklung und Realisierung eigener Ideen,
- meiner Frau, die dieses Vorhaben voll unterstützte und alle Auswirkungen auf unser Privatleben mittrug,
- meinen Kollegen W.Buck, J.Parisi, K.Penner, H.Seifert, K.Selig und H.Weissbrod für ihre engagierte Mitarbeit
- Herrn H.Wener und Frau M.L.Fenske für ihre Unterstützung in allen technischen und verwaltungstechnischen Fragen,
- den Herren W.Bleier, A.Grammer, E.Jacobson, H.Lindel, B.Stütz und L.Zech vom Lehrstuhl für Experimentalphysik I für ihre vorbehaltlose Unterstützung in allen EDV-Fragen,
- den physikalischen Werkstätten für die gute Zusammenarbeit,
- der Deutschen Forschungsgemeinschaft für die finanzielle Unterstützung der Arbeit.

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41543904_0072

Abstract

Mühlemeier, Bernhard

Zeitliche Struktur der Spannung beim strominduzierten Widerstand von Typ-I-Supraleitern

Wird eine supraleitende Probe mit einem überkritischen Strom belastet, so verliert sie die Eigenschaft des verlustfreien Stromtransportes, sie zeigt einen strominduzierten Widerstand. Wie die Supraleitung zusammenbricht, hängt stark von der Art des Supraleiters (Typ-I, Typ-II, Reinheit) und der Geometrie der Probe ab.
Bei Proben aus Typ-I-Supraleitern mit großem Entmagnetisierungsfaktor des Leitungsquerschnitts (z.B. Ellipse mit a>>b) entstehen an den Probenrändern zylinderförmige normalleitende, magnetfelddurchsetzte Domänen, sogenannte Flußschläuche. Sie durchqueren die Probe senkrecht zur Stromrichtung und verlassen sie am entgegengesetzten Rand, oder werden im Probeninneren von entgegengesetzt gepolten Flußschläuchen neutralisiert.
Die theoretische Behandlung der Flußschlauchdynamik (Clem, Buck et. al.) sagt eine starke zeitliche Struktur der Flußschlauchbewegung und der damit verbundenen Spannung voraus.
Die vorliegende Arbeit beschreibt die direkte zeitaufgelöste Messung dieser Spannung. Sie erfordert eine hohe Spannungsauflösung (10nV-Bereich) bei gleichzeitig hoher Zeitauflösung (die Grundfrequenz der Flußschlauchnukleation liegt im Bereich 100kHz - einige MHz). So wird zunächst die zur Messung entwickelte Meßanlage beschrieben (Verfahren: digitales Multi-point-averaging mit hochpräziser Differenzmessung). Dann werden die wichtigsten Ergebnisse präsentiert und unter Verwendung des theoretischen Modells diskutiert. Abschliessend werden die durchgefuehrten Kontrollmessungen dargestellt.
Alle Ergebnisse zeigen eine gute Übereinstimmung mit dem theoretischen Modell und auch weiterführende Messungen (Parisi et.al., Penner et.al.) bestätigen die vorliegenden Ergebnisse.

INHALT

1 EINLEITUNG

1.1 SUPRALEITUNG UND MAGNETISMUS 1
1.2 SUPRALEITER UNTER STROMBELASTUNG 3
1.3 DER STROMINDUZIERTE ZWISCHENZUSTAND 6
1.4 SPANNUNGSMESSUNGEN AM STROMINDUZIERTEN ZWISCHENZUSTAND 8

2 DIE MESSANLAGE

2.1 EINFÜHRUNG 14
2.2 DAS MESSVERFAHREN 18
2.2.1 Auswahl des Meßverfahrens 18
2.2.2 Grenzen der Signalmittelung 22
2.2.3 Realisierungsmöglichkeiten und Folgeprobleme . . 25
2.3 DER AUFBAU DER ANLAGE 32
2.3.1 Auswahl der Meßtechnik 32
2.3.2 Die Komponenten der Anlage 33
2.3.3 Die Verknüpfung der Komponenten 40
2.3.3.1 Strompulsversorgung - Probe,Signalaufzeichnung . 40
2.3.3.2 Verstärkeranlage - Rekorder 43
2.3.3.3 Transientenrekorder - Prozeßrechner 44
2.3.3.4 Prozeßrechner - Standardperipherie 51
2.4 DIE LEISTUNGSFÄHIGKEIT DER ANLAGE 54
2.4.1 Tests der Anlage 54
2.4.1.1 Die Mittelungsanlage ohne Vorverstärkung 54
2.4.1.2 Die Mittelungsanlage mit Vorverstärkersystem . . 56
2.4.2 Aktueller Stand und Ausblick 59
2.4.2.1 Der aktuelle Stand 59
2.4.2.2 Ausblick 62

3 DIE ZEITABHÄNGIGKEIT DER FLUSS-WANDERUNGS-SPANNUNG

3.1 DIE MESSTECHNIK 64
3.1.1 Der Aufbau des Experiments 64
3.1.2 Der Ablauf der Experimente 66
3.1.2.1 Die Ansteuerung bei den zeitaufgelösten Messungen 66
3.1.2.2 Der Gesamtablauf 69
3.2 DIE ERGEBNISSE 70
3.2.1 Die Zeitspannungskurve 70
3.2.1.1 Die erwartete Signalform 72
3.2.1.2 Die Interpretation der Meßkurven 77
3.2.2 Weitere Ergebnisse 81
3.2.3 Zusammenfassung der Ergebnisse 83

4 KONTROLLMESSUNGEN

4.1 MESSANLAGENBEZOGENE KONTROLLEN 85
4.1.1 Störunterdrückung bei supraleitender Probe . . . 85
4.1.2 Vergleich mit der Gleichspannungsmeßanlage . . . 85
4.2 PARAMETERVARIATION UND ERWEITERTE AUSWERTUNG . . . 86
4.2.1 Reproduzierbarkeit 86
4.2.2 Vergleich mit der Nullinie 87
4.2.3 Zeitliche Verschiebung des Spannungseinsatzes . 88
4.2.4 Nukleationsfrequenz als Funktion der Stromsumme 89
4.3 KONTROLLEN DURCH ERWEITERTE MESSUNGEN 90
4.3.1 Gleichspannungsmessungen 90
4.3.2 Magnetooptische Beobachtung 91
4.3.3 Geänderte Meßkreisgeometrie 93

5 ZUSAMMENFASSUNG

5.1 ZUSAMMENFASSUNG 95

ANHANG

A.1 FREQUENZVERHALTEN DES MITTELUNGSPROZESSES 98
A.2 PRETRIGGERMODE 101
A.3 SCHALTUNG DES OPTOKOPPLERS 103
A.4 FILTER ZUR BANDLIMITIERUNG 104
A.5 KOPPLUNG TRANSIENTENREKORDER-I/O-REGISTER 106
A.6 PROBEN 112
A.7 GERÄTE 113
A.8 LITERATUR 115

KAPITEL 1

EINLEITUNG

1.1 SUPRALEITUNG UND MAGNETISMUS

Neben der idealen Leitfähigkeit, die ihm seinen Namen gab, zeigt der supraleitende Zustand auch die Eigenschaft des idealen Diamagnetismus /1/. Das bedeutet, daß eine supraleitende Probe magnetischen Fluß aus ihrem Inneren verdrängt, unabhängig davon, ob das magnetische Feld bei Eintritt der Supraleitung anliegt oder erst nachher angelegt wird. Lediglich in einer dünnen Wechselwirkungsschicht überlappen magnetisches Feld und supraleitendes Material.

Wie jeder thermodynamische Zustand hoher Ordnung, kann auch der supraleitende Zustand durch Energiezufuhr -z.B. Erwärmung- zerstört werden. Beim supraleitenden Zustand ist eine der Möglichkeiten der Energiezufuhr die Erhöhung eines anliegenden magnetischen Feldes. Die magnetische Flußdichte, bei der ein Supraleiter trotz konstanter unterkritischer Temperatur in den normalleitenden Zustand übergeht, nennt man entsprechend das thermodynamische kritische Feld.

So einfach, wie bisher beschrieben, zeigt sich der Ablauf solcher Experimente aber nur in idealisierten Fällen. Bei realistischer Betrachtung kann oft die Auswirkung des Supraleiters auf das magnetische Feld nicht vernachlässigt werden. Abhängig von der Probengeometrie und ihrer Orientierung zum externen magnetischen Feld verzerrt der diamagnetische Supraleiter das magnetische Feld, es wird in bestimmten Raumbereichen verdünnt, in anderen verdichtet (Bild 1.1). Durch die Verdichtung kann an diesen Stellen des Supraleiters die kritische Feldstärke überschritten werden, obwohl das ungestörte Feld eine weit geringere Feldstärke hat /2,3/.

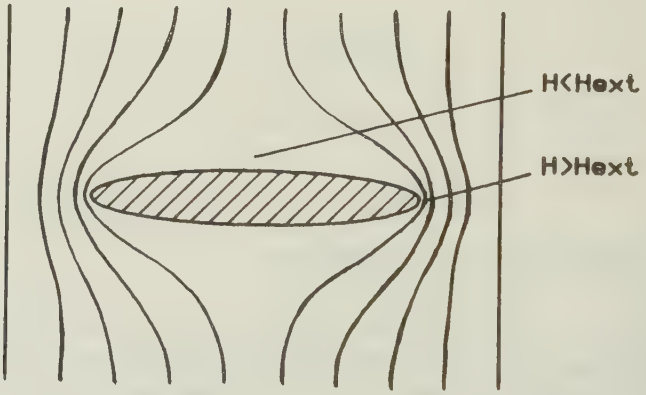


Bild 1.1: Feldverdichtung und -verdünnung durch einen Supraleiter mit großem Entmagnetisierungsfaktor

Die Reaktion des Supraleiters auf diese Situation ist mit dem Verhalten einer Flüssigkeitsmenge vergleichbar, die zu gering ist um ein vorgegebenes Volumen ganz auszufüllen und zu kalt um vollständig in die Gasphase überzugehen: das Gleichgewicht wird hergestellt indem beide Phasen -flüssig und gasförmig- in passenden Raumanteilen auftreten. Beim Supraleiter bedeutet das, daß sich normalleitende, magnetfelddurchsetzte Gebiete in der sonst weiterhin supraleitenden Probe bilden.

Die Art der Domänenbildung und ihre endgültige Konfiguration hängen stark von Material und Vorgeschichte der Probe, sowie ihrer Orientierung zum Magnetfeld ab /2/. Anhand der typischen Größe der normalleitenden Domänen werden die supraleitenden Materialien in zwei Arten, Typ I und Typ II, eingeteilt. Bei Typ II-Supraleitern durchdringt der magnetische Fluß die Probe immer in Einheiten von je einem Flußquant als sogenannte Flußlinie, während er Typ I-Material generell in großen, viele Flußquanten umfassenden Einheiten durchsetzt. Für beide Domänentypen gilt aber, daß der magnetische Fluß vom Rand her in die Probe eindringt und so die Randfeldstärke reduziert /4/. Zugleich bewirkt das Eindringen des magnetischen Flußes in das Probeninnere eine gleichmässigere Verteilung des magnetischen Flußes im Raum, was eine Verringerung der Feldverzerrungsenergie bedeutet. Ingesamt gibt der supraleitende Zustand dem Druck des Magnetfeldes also teilweise nach und erreicht so eine neue Gleichgewichtskonfiguration, den Zwischen- (Typ I) bzw. Mischzustand (Typ II).

1.2 SUPRALEITER UNTER STROMBELASTUNG

Die ideale Leitfähigkeit eines Supraleiters verleiht ihm eine sehr große, dissipationsfreie Stromtragfähigkeit. Aber schon aus dem bisher Gesagten folgt die Existenz einer Obergrenze der Stromtragfähigkeit, denn jeder elektrische Strom ist von einem magnetischen Feld umgeben. Dieses strombedingte Magnetfeld belastet den Supraleiter genauso wie ein externes Magnetfeld, zerstört also den supraleitenden Zustand zumindest teilweise, wenn es die kritische Feldstärke überschreitet.

Wie im Fall externer Felder hängen die Vorgänge beim strominduzierten Zusammenbruch der Supraleitung stark von der Geometrie der Probe ab (die Orientierung der Probe zum Felde kann hier nicht frei variiert werden). Bei Proben mit großem Entmagnetisierungsfaktor existiert auch hier ein Feldbereich -und damit ein entsprechender Strombereich- in dem der Supraleiter mit der Ausbildung einer inhomogenen Struktur reagieren

muß (Bild 1.2).

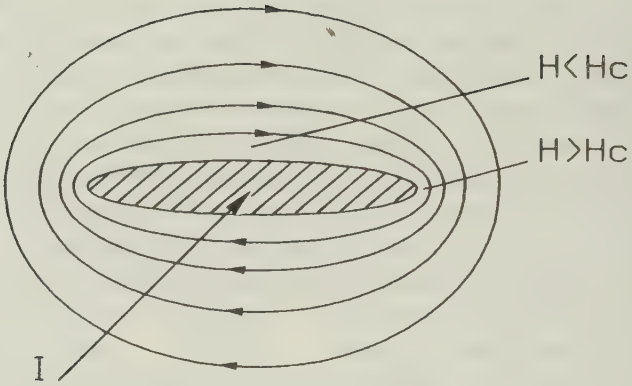


Bild 1.2: Magnetfeld eines stromtragenden Supraleiters mit grossem Entmagnetisierungsfaktor bei gerade ueberkritischem Strom

Trotz der großen Ähnlichkeiten bestehen aber auch wesentliche Unterschiede zwischen dem Fall externer und strombedingter Felder. Diese Unterschiede sind besonders groß bei den im folgenden behandelten Typ I Supraleitern, die -im Gegensatz zu Typ II Supraleitern- verschiedenste Formen normalleitender Domänen ausbilden können.

Das Eindringen magnetischen Flusses in den Rand des strombelasteten Supraleiters bringt zunächst keine lokale Entlastung: der supraleitende Querschnitt der Probe nimmt durch das Eindringen der normalleitenden Domäne ab. So entsteht eine Engstelle im supraleitenden Material, wodurch an dieser Stelle die Stromdichte und damit die lokale Feldstärke steigt /2/. Das Eindringen des magnetischen Flusses verstärkt sich also selbst und endet erst, wenn eine praktisch durchgehend normalleitende Schicht quer zum Stromfluß entstanden ist. Dann nämlich durchfließt der Transportstrom diese Schicht als Normalstrom, d.h. der gesamte Leiterquerschnitt wird von Strom und magnetischem Feld durchsetzt, die lokale Flußdichte ist gegenüber der Ausgangssituation verringert.

Diese Vorstellung vom strominduzierten Zusammenbruch der Supraleitung ist geprägt von der Existenz statischer normalleitender Domänen. Im Gegensatz zum Fall externer Magnetfelder ist hier aber auch ein dynamischer Zustand als Reaktion des Supraleiters auf die Feldbelastung möglich.

Die beim statischen Modell auftretende Instabilität beim Flußeintritt in den Supraleiter kann vermieden werden, wenn das Eindringen keine Vergrösserung sondern nur eine Umverteilung des normalleitenden Flächenanteils bewirkt. Dazu müssen sich Teile der normalleitenden Randstruktur, sogenannte Flußschläuche, vom Rand ablösen und ins Innere des Supraleiters wandern (Bild 1.3).

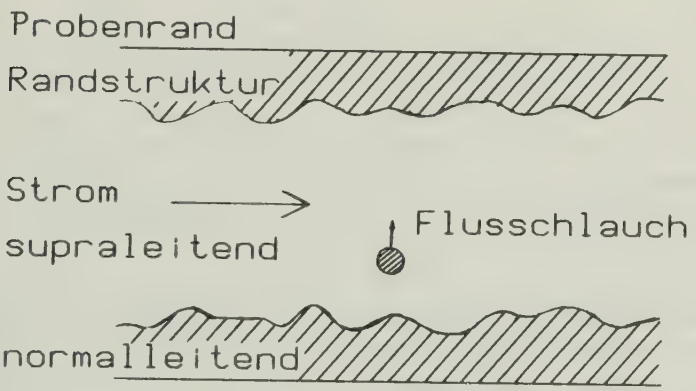


Bild 1.3: Flußschlauchnukleation: Teile der normalleitenden Randstruktur loesen sich und wandern ins Probeninnere

Die so entstehende Flußkonfiguration mit Flußschläuchen im Probeninnern bringt wirklich die notwendige Entlastung des Randes /4/, da die Flußschläuche Fluß vom Rand ins Probeninnere transportieren. Sie ist aber, und das gilt nun auch wieder für Typ II Supraleiter, nicht stabil (*): das magnetische Feld der normalleitenden Domänen tritt in Wechselwirkung mit

(*) Es wird eine ideale haftkraftfreie Probe angenommen.

dem Transportstrom, die Lorentzkraft /2,4/ (#) treibt die magnetische Domäne zum gegenüberliegenden Rand der Probe, wo sie den Supraleiter wieder verläßt (asymmetrischer Fall), oder entgegengesetzt gepolten Domänen entgegen, die vom anderen Probenrand kommen und sie in einem gegenseitigen Vernichtungprozeß auflösen (symmetrische Proben). Die erreichte Feldentlastung des Probenrandes kann also nur durch eine laufende Neugeneration von Flußschläuchen, also einen dynamischen Zustand, aufrecht erhalten werden.

1.3 DER STROMINDUZIERTE ZWISCHENZUSTAND

Während sich bei Draht und Zylindergeometrien (wieder auf Typ I bezogen) das statische Modell als tragfähiger erwies /2/, konnte für Dünnfilmgeometrien bei relativ kleinen Strombelastungen die Gültigkeit des dynamischen Modells nachgewiesen werden. Es beschreibt den strominduzierten Zwischenzustand, wie oben entwickelt, als dynamischen Zustand, bei dem bewegte Flußschläuche die nötige Magnetflußumverteilung bewirken.

Die wesentlichen Schritte bei diesem Nachweis waren

- die magnetooptische Beobachtung von Flußkanälen beim Zusammenbruch der Supraleitung /5/,
- die Lokalisierung des ersten Flußkanals durch eine eingeschnürte Probengeometrie /6/ (Bild 1.4)
- die zeitaufgelöste magnetooptische Beobachtung einzelner Flußschläuche im lokalisierten Flußkanal mit Hilfe eines Hochgeschwindigkeits-Stroboskops /7,8/.

Dabei war jeweils die Entwicklung einer passenden mathematischen Beschreibung der Vorgänge mit eingeschlossen.

Diese Beschreibung konzentriert sich auf die Bewegung

(#) Faßt man den Flußschlauch im wesentlichen als Stromwirbel auf und betrachtet die Wechselwirkung mit dem Transportstrom als Wechselwirkung zweier Ströme, so ergibt sich zumindest qualitativ das gleiche Bild.

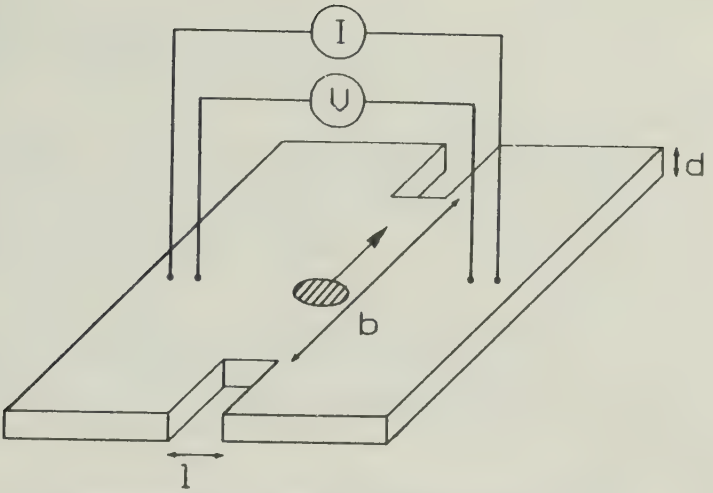


Bild 1.4: Probengeometrie einer eingeschnürten Probe mit Standardkontaktgeometrie (schematisch)

normalleitender Domänen in supraleitender Umgebung. Dazu werden, mit Ausnahme der Lorentzkraft, aus entsprechenden Energietermen die Kräfte abgeleitet, die die Domäne antreiben. So kann z.B. der Edge-Pinning-Effekt /9/, das ist die Wirkung von Probenkanten als starke Haftstellen für normalleitende Domänen, durch Kräfte erklärt werden, die allein der Existenz der Domäne entspringen.

Mit der Verfeinerung der Messtechnik (Übergang von der Flußkanal- zur Flußschlauchbeobachtung) wurde auch das mathematische Modell verfeinert. Im damals letzten Schritt /8/ wurden, wie auch bei den heutigen Modellrechnungen zur Flußschlauchdynamik /10,11,12/, folgende Kräfte berücksichtigt:

- die Barrierenkräfte: sie resultieren aus der Existenz des Flußschlauchs (die Entstehung kostet Kondensations- und Feldenergie) und sind somit an den Rändern der Probe besonders groß und immer zum nächstliegenden Probenrand gerichtet,

- die Lorentzkraft: sie beschreibt die Wechselwirkung des Flußschlauchs mit dem Transportstrom und ist in Größe und Richtung vom Flußschlauchinhalt und von der lokalen Stromdichte abhängig,
- die Wechselwirkungskraft: mit ihr wird die gegenseitige Beeinflußung der Flußschläuche erfaßt; sie wirkt zwischen Flußschläuchen mit gleichgerichteten Magnetfeldern repulsiv, zwischen antiparallel orientierten Flußschläuchen attraktiv,
- die Dämpfungskraft: in ihr werden alle Dämpfungsmechanismen bei der Flußschlauchbewegung zusammengefaßt; sie ist als geschwindigkeitsabhängige Reibungskraft jeweils der Momentangeschwindigkeit des Flußschlauchs entgegengerichtet.

Unter Verwendung dieser Ansätze konnten, passend zur experimentellen Situation, Flußschlauchgeschwindigkeit und -position berechnet und mit den Resultaten der magnetooptischen Messungen verglichen werden /8/.

Der Vollständigkeit der Übereinstimmung von Experiment und Rechnung sind dabei prinzipiell Grenzen gesetzt, da Haftkräfte im Innern der Probe und die Wirkung unbewegter Flußschläuche auf die bewegten nicht mit in das Modell einbezogen werden können. Ihre Verteilung und ihre Stärke sind nämlich zufällig und können selbst magnetooptisch nicht detailliert ausgemessen werden.

1.4 SPANNUNGSMESSUNGEN AM STROMINDUZIERTEN ZWISCHENZUSTAND

Wie oben schon angedeutet, bedeutet das Auftreten des strominduzierten Zwischenzustands das Ende des dissipationsfreien Stromflusses. Sobald also dieser Zustand eintritt, wird an der Probe eine Spannung abfallen.

Beim statischen Modell ist das unmittelbar einsichtig, da dort ja Normalströme fließen. Beim dynamischen Modell bestehen aber immer noch vollständig supraleitende Verbindungen entlang der ganzen Probe und die entstehende

Spannung kann somit nicht auf eine ohmsche Widerstandsschicht zurückgeführt werden.

Daß trotz der supraleitenden Verbindungen eine Spannung an der Probe auftreten muß, ergibt sich daraus, daß ein bewegter Flußschlauch zumindest in seinem normalleitenden Innern Normalströme induziert (Bardeen-Stephen-Modell), also Energie umsetzt. Die so zur Flußschlauchbewegung benötigte Energie wird der Stromquelle entnommen. Sie gibt Energie mit der Leistung P=I*V an die Probe ab.

Eine mikroskopische Erklärung der Spannung über eine supraleitende Verbindung liefert die Josephson-Relation

$$U = \frac{\hbar}{2e} * \frac{d\varphi}{dt} \quad , \quad \varphi = \varphi_2 - \varphi_1 \, ,$$

φ_1, φ_2 Phase des Supraleiters an den Punkten 1 und 2.

Sie stellt eine Verbindung zwischen der Phasendifferenz des supraleitenden Zustands an zwei Punkten eines Supraleiters und der Spannung zwischen diesen Punkten her /2,13/. Bei stehenden Flußstrukturen ändert sich die Phasendifferenz nicht ($d\varphi/dt=0$). Die Spannung ist dementsprechend Null. Bei bewegten Flußstrukturen treten Phasendifferenzänderungen auf ($d\varphi/dt\neq0$). Es fällt eine endliche Spannung am Supraleiter ab.

Bei den Experimenten zum Nachweis des dynamischen Modells an Dünnfilmgeometrien und dessen weiterer Untersuchung wurde diese Spannung jeweils als Gleichspannungs-Strom-Spannungs-Kennlinie aufgezeichnet und auch oft benutzt um z.B. einen geeigneten Arbeitspunkt für die magnetooptische Beobachtung einzustellen.

Eine typische Strom-Spannungs-Kennlinie der Proben mit eingeschnürter Geometrie zeigt Bild 1.5. Die wesentlichen Elemente daran sind der Spannungssprung bei dem kritischen Strom I=Ic und der anschließende lineare Anstieg. Der Spannungssprung markiert den Einsatz der Flußschlauchbewegung in einem einzigen Flußkanal /6/. Er resultiert aus einer Mindestflußschlauchgröße in Typ I Supraleitern /4/. Die lineare Steigung zeigt die Zunahme der Flußschlauchnuk-

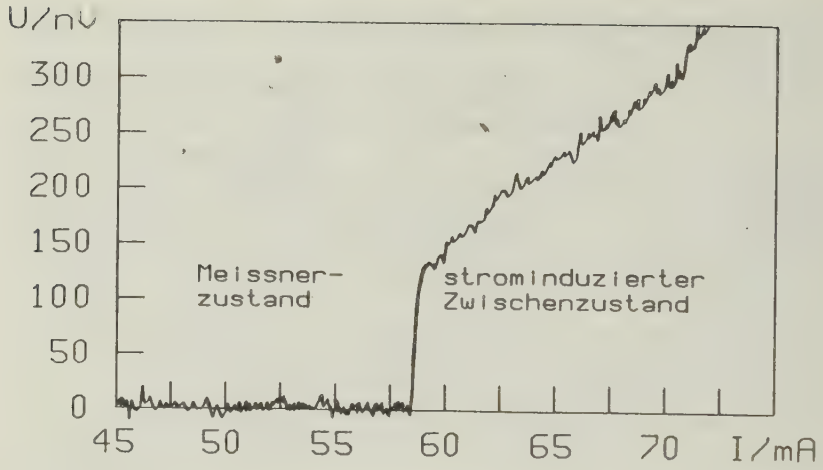


Bild 1.5: Typische Strom-Spannungs-Kennlinie von Proben aus Typ I Supraleitern mit eingeschnürter Geometrie (Probe In-4 bei T = 3.0 K)

leationsfrequenz in dem Flußkanal mit steigendem Strom entsprechend der Relation /2/

$$U = \Phi * f,$$

U = zeitgemittelte Spannung,
Φ = Flußschlauchinhalt,
f = Flußchlauchnukleationsrate.

Dabei wird ein stromunabhängiger Flußschlauchinhalt vorausgesetzt (eine detaillierte Behandlung des Flußschlauchinhalts enthält /4/).

Gleichspannungsmessungen sind -wegen der hohen erreichbaren Auflösung von einigen Nanovolt- geeignet, einen resistiven vom supraleitenden Zustand zu unterscheiden. Andererseits bedeutet eine Gleichspannungsmessung immer einen gewissen Informationsverlust, da dabei etwaige zeitliche Strukturen der gemessenen Spannung unterdrückt werden. Es ist also zu prüfen, ob bei einem gleichspannungsmäßig untersuchten Effekt nicht auch zeitliche Strukturen auftreten, deren Messung weitere Informationen erbrächte.

Im vorliegenden Fall war demnach zu untersuchen, ob die gemessene Flußwanderungsspannung zeitliche Strukturen aufweisen könnte. Das Auftreten solcher Strukturen ist sehr plausibel, da die Flußwanderung in diskreten Einheiten erfolgt, die zudem eine stark inhomogene Geschwindigkeitsverteilung aufweisen /7,8/. Es mußten also Möglichkeiten gefunden werden, von den bekannten und berechenbaren Daten, den Kräften auf einen Flußchlauch und der Flußschlauchgeschwindigkeit, auf die Spannung an der Probe zu schließen und die Ergebnisse ggf. auch experimentell zu überprüfen.

Die theoretische Frage entsprach dem schon bekannten Problem der Spannungsentstehung beim Flußwanderungsprozeß in Typ II Supraleitern, wo der resistive Zustand ja aus bewegten Flußlinien bestehen muß. In /14/ präsentierte Clem ein eichinvariantes Verfahren zur Berechnung der zeitabhängigen Spannung, die eine bewegte Flußlinie oder ein bewegter Flußschlauch erzeugt. Der resultierende Ausdruck berücksichtigt dabei -im Gegensatz zur oben aufgeführten Josephson-Relation- die Auswirkung der Meßkreisgeometrie auf das zu erwartende Meßergebnis. In /15/ stellte er dann eine Beziehung zwischen einer vorgegebenen Flußschlauchgeschwindigkeit v und der zu messenden Spannung U her. Die Spannung U(t) ist proportional zur Flußschlauchgeschwindigkeit v(t) und einem Geometriefaktor G

$$U(t) \sim G * v(t).$$

Dabei beschreibt der Geometriefaktor die Wirkung der Meßkreisgeometrie. Bei der üblichen Anordnung der Meßkontakte (Bild 1.4) betont er die erzeugte Spannung, wenn sich der Flußschlauch an den Probenrändern befindet (eine andere Meßkreisgeometrie wird in /21/ behandelt, siehe auch Kapitel 4).

Damit lag eine geschlossene Beschreibung von den ortsabhängigen Kräften auf die Flußschläuche (siehe oben) bis zur zeitabhängigen Spannung vor. Sie sagte -in Übereinstimmung mit den Plausibiltätsbetrachtungen- eine starke zeitliche Struktur der Flußwanderungsspannung voraus. Insbesondere sollten bei der Flußschlauchvernichtung hohe, kurze Spannungspulse entstehen.

Parallel zu dieser Entwicklung wurde das Problem des experimentellen Nachweises dieser Spannungsstruktur angegangen. Es besteht darin, sehr kleine Spannungen (einige 100 nV) mit hoher Zeitauflösung (die Nukleationsrate der Flußschläuche liegt im Bereich von 100 kHz bis einige MHz) aufzuzeichnen. Erste Messungen dazu /16/ zeigten auch eine Zeitstruktur mit Spannungspulsen der erwarteten Höhe und zeitlichen Verteilung, waren aber durch zwei Umstände begrenzt:

- die Zeitauflösung der Meßanlage war durch die obere Grenzfrequenz von ca. 600 kHz so begrenzt, daß bei den üblichen Nukleationsfrequenzen nur die Existenz, nicht aber die Form der Spannungspulse erfasst werden konnte.
- die zum Aufzeichnungsverfahren (Signalmittelung) nötige gepulste Ansteuerung der Probe erzeugte so große Störungen, daß der Zeitbereich der Flußschlauchentstehung der Messung völlig unzugänglich war.

Das Ziel der vorliegenden Arbeit war es nun, die Gültigkeit der heutigen Vorstellungen vom Flußwanderungsprozeß in Typ I Supraleitern zu überprüfen und so ein besseres, detaillierteres Verständnis über das Zusammenspiel der verschiedenen Kräfte unterschiedlichen Ursprungs zu entwickeln.

Um diese Ziele zu erreichen, mußte die Zeitstruktur der Spannung mit besserer Zeitauflösung als bisher und möglichst über die gesamte Existenzzeit der Flußschläuche aufgezeichnet werden. Dazu mußte zunächst eine Meßanlage aufgebaut werden, die eine ausreichende Spannungsauflösung bei gleichzeitig hoher Zeitauflösung erreicht. Dies wird in Kapitel 2 beschrieben.

Zum zweiten war nach einem Verfahren zu suchen, das auch die Flußschlauchentstehung der Messung zugänglich macht und ggf. mit der Meßanlage zu realisieren. Ein solches Verfahren konnte entwickelt werden: es besteht in der Anwendung von hochpräzisen Differenzmessungen bei gleichzeitiger spezieller Ansteuerung der Probe.

Der Ablauf der so ermöglichten Experimente und die dabei erzielten Ergebnisse werden in Kapitel 3 beschrieben. Dieses Kapitel enthält auch die Beschreibung der speziellen Probenansteuerung, da sie den experimentellen Ablauf so stark beeinflußt, dass die Beschreibung der Meßergebnisse nicht von ihr getrennt werden kann. Die Beschreibung der technischen Aspekte des Meßverfahrens (Differenzmessungen) ist in Kapitel 2 enthalten.

Die Interpretation der erzielten Ergebnisse erfolgte mit Hilfe von Modellrechnungen zur Flußschlauchspannung/10,11,12/, die jeweils der experimentellen Situation angepasst wurden. So konnten spezielle Vorstellungen über die Erklärung der Meßergebnisse überprüft und auch neue Interpretationen erarbeitet werden. Auf sie wird jeweils an passender Stelle verwiesen.

In Kapitel 4 werden dann noch spezielle Auswertungen der Messergebnisse und weitergehende Messungen beschrieben, die der Kontrolle und der Ergänzung der erzielten Ergebnisse dienen.

Im Anhang schließlich sind technische Details (Schaltpläne, Geräteliste, Liste der Proben), ausgegliederte Überlegungen und die Literatur zusammengefaßt.

KAPITEL 2

DIE MESSANLAGE

2.1 EINFÜHRUNG

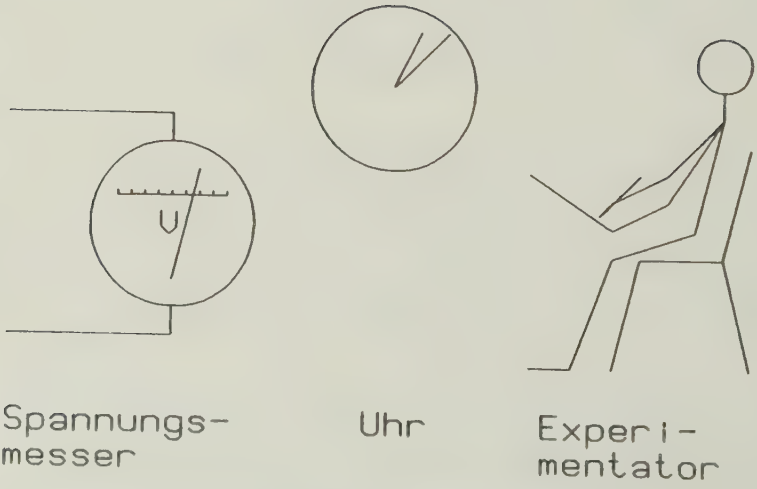


Bild 2.1: Einfache Anordnung zur Aufzeichnung einer Zeit-Spannungs-Kurve

Einen sehr einfachen Aufbau zur Aufnahme einer Zeit-Spannungs-Kurve zeigt Bild 2.1. An die zu vermessende Probe ist ein Spannungsmeßgerät angeschlossen, das der Experimentator in bestimmten Zeitabständen abliest. Der zeitliche Ablauf wird mit Hilfe der Uhr kontrolliert. Die jeweils abgelesenen Werte werden in einer Tabelle notiert und später in ein Diagramm eingezeichnet.

Natürlich wird solch eine Anordnung heute nur in seltenen Fällen benutzt und sie verlangt geradezu nach Verbesserungen. Aber gerade wegen ihrer Einfachheit ist sie geeignet, die wesentlichen Probleme bei der Aufnahme einer Zeit-Spannungs-Kurve zu erläutern.

Betrachtet man die beiden Größen Zeit und Spannung zunächst getrennt, so gilt selbstverständlich die Forderung, daß beide Meßgrößen mit ausreichender Auflösung gemessen werden können. Bei entsprechender Ausrüstung (gute Uhr, passendes Voltmeter) werden diese Forderungen sicher erfüllt.

Für die Aufnahme einer Zeit-Spannungs-Kurve ist aber eine kombinierte Messung beider Größen erforderlich. Dadurch ergeben sich offensichtlich zusätzliche Forderungen an den Aufbau:

- Der Experimentator muß die Uhr beobachten und bei Erreichen eines bestimmten Zeitpunktes jeweils die momentan angezeigte Spannung ablesen und notieren. Dieser Ablauf erzwingt Einschränkungen in den möglichen Ablaufzeiten: die Zeitintervalle zwischen den Ablesungen des Voltmeters sowie die Gesamtmeßdauer dürfen nicht zu groß und nicht zu klein sein: sie müssen den Möglichkeiten des Experimentators angepasst sein.
- Das Voltmeter muß bei jedem Ablesevorgang einen korrekten Spannungswert anzeigen. Es muß also auf den Ableserhythmus abgestimmt arbeiten und in der so beschränkten Meßzeit eine ausreichende Auflösung erreichen.
- Die Einzelwerte der Spannungsmessung müssen nicht nur jeder für sich korrekt sein, sondern sie müssen auch als Folge von Meßwerten den zeitlichen Verlauf der Spannung korrekt wiedergeben. Minima und Maxima der Spannung, die innerhalb eines Meßintervalls vollständig durchlaufen

werden, werden in der notierten Folge unterschlagen. Das Ergebnis zeigt schlimmstenfalls eine völlig andere Kurve als den zu messenden Spannungsverlauf (Aliasing Effekt /17/). Für die Aufnahme einer Zeit-Spannungskurve mit vorgegebener Zeitauflösung muß die Eingangsspannnung also vorverarbeitet werden: ihre maximale Änderungsgeschwindigkeit muß der Zeitauflösung der Messung angepasst sein.

Zusammengefaßt heißt das: neben der Anforderung der ausreichenden Auflösung bei der Messung der beiden Größen Zeit und Spannung müssen die beiden Meßprozesse und das zu messende Spannungssignal aufeinander abgestimmt sein:

- die Verarbeitung der gemessenen Wertepaare muß in ausreichender Geschwindigkeit erfolgen,
- die Dauer einer Spannungsmessung muß der Zeitauflösung entsprechen,
- das Spannungssignal muß entsprechend der Zeitauflösung bandlimitiert sein (Abtasttheorem /17/)

Offensichtlich ist die geschilderte Anordnung nicht geeignet, die Flußwanderungsspannung mit ausreichender Auflösung zu erfassen; sie muß sowohl in der Zeit- als auch in der Spannungsauflösung wesentlich verbessert werden.

Selbstverständlich ist der erste Schritt zur Verbesserung der Zeitauflösung die Verkürzung des Ableseintervalls. So repräsentiert jeder Wert in der Tabelle einen kleineren Zeitraum, es können Feinheiten im Zeitverlauf der Kurve wiedergegeben werden, die bei größeren Meßintervallen in ein einziges Intervall projeziert werden. Soll dabei eine Zeitauflösung erreicht werden, die es erlaubt, die gesuchte Flußschlauchspannung zu messen, kann das natürlich kein Mensch mehr von Hand durchführen. Der gesamte Prozeß der Messung und Speicherung muß vollständig automatisiert werden.

Die Verringerung des Abtastintervalls allein reicht aber nicht aus, die Zeitauflösung effektiv zu verbessern: wie oben beschrieben, muß die Vorbehandlung und Messung der Signalspannung dem Zeittakt der Aufzeichnung angepasst sein,

um eine optimale Wiedergabe der Zeit-Spannungs-Kurve zu erreichen. Es muß also gleichzeitig dafür gesorgt werden, daß

- feinere Zeitstrukturen den Signalvorverarbeitungsprozeß ungestört passieren können, d.h. die Bandlimitierung dem neuen Abtastintervall angepasst wird.
- die Meßzeit des Spannungsmessers so kurz wird, daß er zu jedem Ablesezeitpunkt einen korrekten Wert liefert. Sie muß also kürzer als die Dauer eines Abtastintervalls werden.

Die Spannungsauflösung der Anordnung kann zunächst durch den Einsatz empfindlicherer Spannungsmeßgeräte erhöht werden. Im allgemeinen erfordern aber hochauflösende Messungen viel Zeit, so daß diese Möglichkeit bei der Messung von Zeit-Spannungs-Kurven aufgrund der beschränkten Meßzeit kaum genutzt werden kann.

Weiterhin kann man das Spannungssignal vorverstärken. So können kleine Signale in den Auflösungsbereich des Meßgerätes angehoben werden. Dabei muß das Signal verzerrungsfrei dem empfindlichsten Eingangsbereich des Meßgerätes angepasst werden, ohne es in Zeiten mit großen Signalanteilen zu übersteuern.

Aber auch diese Maßnahme findet schnell ihre Grenze: meist sind dem zu messenden Signal noch z.T. große Störungen überlagert, die eine optimale Verstärkung nicht zulassen. Aber selbst bei ideal störungsfreiem Signal ist eine beliebig große Verstärkung nicht möglich, da jeder Verstärker dem verstärkten Eingangssignal noch ein selbst erzeugtes Rauschen beimischt. Bei sehr kleinen Signalen kann dieses Rauschen das zu messende Signal übersteigen und selbst schon das Spannungsmeßgerät optimal aussteuern.

In diesem Fall kann die Auflösung nur noch durch die Anwendung spezieller Meßtechniken verbessert werden, bei denen Signal und Rauschen unterschiedlich beeinflußt werden. Durch solche Verfahren kann das Signal-Rausch-Verhältnis verbessert werden, d.h. die Signalhöhe kann relativ zur Höhe des Rauschens vergrössert werden, so daß das Signal nicht mehr vom Rauschen dominiert wird.

Wie in der Einleitung beschrieben, liegen die gesuchten Spannungssignale in einem Größenbereich, der der direkten Messung nicht mehr zugänglich ist. Es mußte also zunächst eine Meßanlage zur Messung sehr kleiner Spannungen bei großer Bandbreite aufgebaut werden. In den folgenden Abschnitten wird dieser Aufbau beschrieben: in Abschnitt 2 wird das angewandte Verfahren erläutert; in Abschnitt 3 wird der Aufbau beschrieben und in Abschnitt 4 werden die Kenndaten der bestehenden Anlage einschließlich einiger Erweiterungsmöglichkeiten dargestellt.

Die gesamte Erklärung erfolgte hier in der Sprechweise diskreter Messungen. Dies hat seinen Grund in der Einfachheit und Klarheit dieser Sprechweise. Die gesamte Problematik besteht natürlich auch bei kontinuierlichen Meßverfahren, wie z.B. der Anwendung eines x-t-Schreibers. Fehler in der Abstimmung von Zeit- und Spannungsmessung zeigen sich dann lediglich in anderer Form.

2.2 DAS MESSVERFAHREN

2.2.1 Auswahl des Meßverfahrens

Es gibt verschiedene Verfahren der Signalbearbeitung, die Signal und Rauschen unterschiedlich beeinflussen und so eine Verbesserung des Signal-Rausch-Verhältnisses ermöglichen. Ihre jeweilige Anwendbarkeit hängt vom Charakter des zu messenden Signals ab.

Zunächst muß zwischen extern modulierbaren und explizit zeitabhängigen Signalen unterschieden werden. Bei den hier betrachteten Signalen entfallen die Möglichkeiten der Modulationstechnik. Sie müssen daher weiter nach der Zusammensetzung des Signals und des Rauschens unterschieden werden, denn diese entscheidet über die Anwendbarkeit der verbleibenden Techniken.

Da Zeit-Spannungs-Kurven in jedem Punkt die Summe der Momentanwerte des Signal- und Rauschanteils zeigen, ist es günstiger, die verschiedenen Fälle nicht an Hand dieser Kurven zu diskutieren, sondern an Hand der Amplitudenspektren: hier sind Signal und Rauschen in den meisten Fällen getrennt erkennbar und die Wirkung eines Meßverfahrens kann wie die Wirkung eines Filters eingetragen und allgemein beurteilt werden.

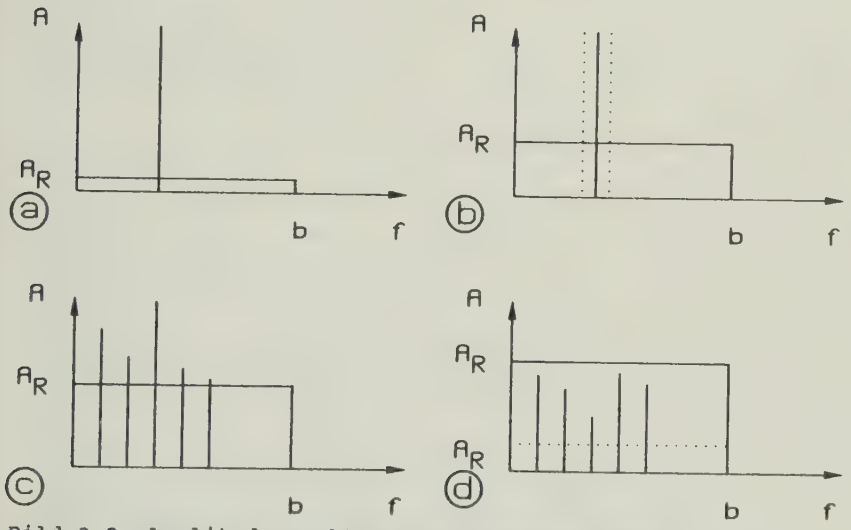


Bild 2.2: Amplitudenspektren verrauschter Signale
(b Bandbreite des Systems, A_R Rauschamplitude/Df,
Df Aufzeichnungsbandbreite; Erläuterungen im Text)

Bild 2.2 zeigt verschiedene mögliche Fälle der Signalspannung relativ zu einem stationären Rauschen, das als weiß innerhalb der Bandbreite b und mit der Auflösung Df aufgezeichnet angenommen wird . Dabei stellen die horizontale Linie das Rauschspektrum, die senkrechten Linien das Signalspektrum dar. Das gesamte Spektrum ist die vertikale Summe der beiden Teilspektren.

Teilbild a zeigt die Situation bei gutem Signal-Rausch-Verhältnis: die Signalanteile übersteigen nicht nur bei ihrer jeweiligen Frequenz den Rauschanteil, der auf diese Frequenz entfällt, sondern auch das über die ganze Bandbreite

aufsummierte Rauschen. Hier sind keine Maßnahmen zur Verbesserung des Signal-Rausch-Verhältnisses nötig.

In Teilbild b wird ein schmalbandiges Signal angenommen, dessen Spektrallinie die entsprechenden Spektralanteile des Rauschen übersteigt, das aber in der Summe vom Rauschen dominiert wird. In diesem Fall ist die Zeit-Spannungs-Kurve nicht mehr ideal: wenn das Signal überhaupt noch zu erkennen ist, ist es stark verrauscht. Dieser Fall ist die Domäne für die Anwendung normaler Frequenzfilter: wie im Bild angedeutet, kann das Signal gegenüber dem Rauschen hervorgehoben werden, indem die Übertragungsbandbreite der Signalstrecke auf einen möglichst engen Bereich um die Signalfrequenz herum eingeschränkt wird.

Eine ähnliche Situation zeigt Teilbild c: die Amplitudenverhältnisse sind wie in Teilbild b, das Signalspektrum enthält aber viele Komponenten. Ein zu b analoges Vorgehen erfordert ein Kammfilter, was technisch wesentlich aufwendiger als ein Bandpass ist und praktisch nicht angewandt werden kann, wenn die Signalfrequenzen nicht bekannt sind oder durch Parametervariation während des Experiments verändert werden müssen.

Hier kann das Signal-Rausch-Verhältnis nur verbessert werden, wenn man den unterschiedlichen Charakter von Signal und Rauschen ausnutzt: bei Wiederholung des Ereignisses wird sich das Signal nur sehr wenig - im Idealfall garnicht - von dem im vorhergehenden Zyklus unterscheiden, während das Rauschen einen ganz anderen zeitlichen Verlauf zeigen wird. Bei einer Summation entsprechender Meßpunkte über viele Messungen wird der Signalanteil der Summe mit der Zyklenzahl linear ansteigen, während die Summe der Rauschanteile aufgrund der wechselnden Beiträge pro Zyklus langsamer - bei weißem Rauschen mit der Wurzel aus der Zyklenzahl /17,18/- steigt. Die Summation vieler Messungen vergrößert also das Signal relativ zum Rauschen, das Signal-Rausch-Verhältnis wird verbessert. Um den korrekten Spannungswert zu erhalten, braucht nach ausreichender Summation nur noch durch die Anzahl der Zyklen dividiert zu werden. Es wird also das arithmetische Mittel über viele Meßzyklen gebildet, das

Verfahren heißt daher Signalmittelungsverfahren.

Bei dieser Erklärung wird das Signalmittelungsverfahren in der Zeitdomäne beschrieben, es stellt sich also noch die Frage, wie es sich in der üblichen Beschreibung in der Frequenzdomäne darstellt. Diese erhält man qualitativ durch eine Übersetzung des beschriebenen Ergebnisses einer Mittelungsmessung in die Frequenzdomäne. Das Rauschen wird vermindert während die Spektralkomponenten des Signals ungeschwächt ins Ergebnis eingehen. Somit stellt sich das Mittelungsverfahren im Spektrum als ein auf das Signal abgestimmtes Kammfilter dar. Es entspricht also genau der oben zuerst genannten Lösung, wobei sich das Kammfilter hier automatisch den Signalfrequenzen anpasst. Entscheidend für seine Wirkung ist, daß die Bandbreite der Kammzähne mit der Zahl der gemittelten Zyklen abnimmt /19/: je mehr Zyklen gemittelt werden, desto schmalbandiger werden Signal und Rauschen effektiv aufgezeichnet. Während nun die Beiträge des Signals zum Spektrum nur wenig (im Idealfall garnicht) von der Bandbreite der Aufzeichnung abhängen, sind die Amplituden des Rauschspektrums stark davon abhängig: sie sinken mit abnehmender Bandbreite, im Spektrum des Ergebnisses erscheint das Rauschen mit verringerter Amplitude. Im Endeffekt ergibt sich die erwartete Verbesserung des Signal-Rausch-Verhältnisses.

Mit dieser Erklärung ist auch die Wirksamkeit der Mittelung bei einer auf den ersten Blick aussichtlosen Situation verständlich, wie sie in Teilbild d dargestellt ist. Die Signalanteile des Spektrums werden bei der angenommenen Aufzeichnungsbandbreite Df von den entsprechenden Rauschanteilen dominiert. Hier wäre sogar ein Kammfilter wirkungslos, wenn seine Linienbandbreite nicht kleiner als Df ist. Beim Mitteln wird nun gerade diese Bandbreite erniedrigt, das Spektrum des Ergebnisses zeigt also -wie im Bild eingezeichnet- erniedrigte Rauschanteile, insbesondere auch in den Zähnen des Kammfilters.

Wie in der Einleitung beschrieben, werden bei der Messung der Flußwanderungsspannung kurze Spannungspulse mit steilen Flanken erwartet. Dies bedeutet im Frequenzbild eine Vielzahl von Spektrallinien. Zudem ist die Frequenz dieser Spektrallinien nur ungefähr bekannt (siehe auch Kapitel 3) und während des Experiments starken Änderungen unterworfen (siehe Kapitel 4). Somit ist die Signalmittelung das einzige geeignete Verfahren zur Messung der erwarteten Spannung. Ihre Anwendung setzt aber die willkürliche Wiederholbarkeit (Repetierbarkeit) des Meßzyklus' voraus und die Qualität der Resultate hängt entscheidend von der Genauigkeit der Wiederholung von Zyklus zu Zyklus ab. Beides war - wie in der Einleitung beschrieben - durch magnetooptische Experimente /7/ und die niederfrequenten Messungen von Parisi u.a. /16/ ausreichend belegt.

2.2.2 Grenzen der Signalmittelung

Wie jedes andere Meßverfahren, liefert die Signalmittelung nur unter idealen Voraussetzungen ideale Ergebnisse. In der Praxis sind die Ergebnisse durch folgendes begrenzt:

- Die Zeitauflösung wird im Idealfall nicht vom Mittelungsprozeß beeinflußt, sondern allein durch die Abtastrate des Aufzeichnungsgerätes und die obere Grenzfrequenz der Signalvorverarbeitung bestimmt. Ideal heißt hier, daß jede Aufzeichnung zum exakt gleichen Zeitpunkt des Meßzyklus gestartet wird. Diese Bedingung ist nie exakt erfüllt, da selbst beste Geräte Abweichnungen vom idealen Triggerverhalten zeigen .

  Diese Abweichungen führen dazu, daß der Spannungswert Vi, der exakt dem Zeitpunkt t(i) zugeordnet werden muß, manchmal auch den Zeitpunkten t(i+1) und t(i-1) zugeordnet wird. Es erfolgt also nicht nur die beabsichtigte Mittelung in der Spannungsrichtung, sondern auch eine Mittelung in der Zeitrichtung: zu jedem Endwert Ui tragen neben dem Spannungwert Vi auch die Werte Vi+1 und Vi-1 bei.

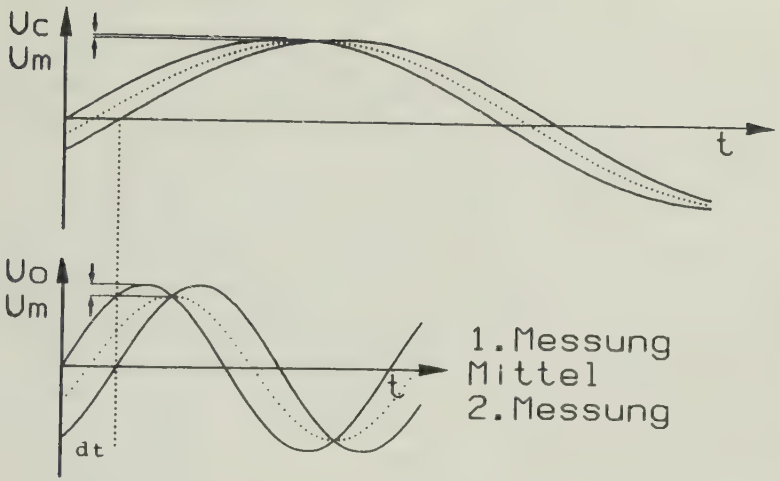


Bild 2.3: Frequenzabhängigkeit der Signaldämpfung bei Mittelungsmessungen durch Triggerschwankungen

Bild 2.3 zeigt an Beispielen mit einer angenommenen Verschiebung um gerade ein Abtastintervall, wie diese Mittelung über die Zeitachse die Zeitauflösung des Endergebnisses beeinflußt. Die konstruktive Interferrenz der aufeinanderfolgenden Meßkurven ist nicht mehr vollständig. Dabei hängt der Grad der Verschlechterung von der aufgezeichneten Frequenz ab. Ist die Periode T einer aufgezeichneten Sinuswelle groß gegen das Verschiebungszeitintervall dt (Teilbild a) so wird das Ergebnis nur geringfügig verschlechtert; ist sie dagegen mit dt vergleichbar (Teilbild b), so erscheint die Welle im Endergebnis stark gedämpft. In speziellen Fällen (z.B. dt=T/2 und gleiche Anzahl Aufzeichnungen in beiden Positionen) wird die Interferrenz vollständig destruktiv: das Mittel über viele Messungen ist praktisch Null.

Somit wirkt sich eine Triggerunsicherheit bei der Aufzeichnung im Ergebnis einer Mittelungsmessung wie ein Tiefpass im Signalweg aus: hohe Frequenzen, d.h. die Informationsträger der feinen Zeitstrukturen werden

gedämpft, ihre Information geht verloren. Bei der quantitativen Betrachtung (Anhang A.1) zeigt sich, daß die Filterwirkung von der Anzahl der gemittelten Zyklen unabhängig ist und die Charakteristik eines digitalen 'Moving-Average-Filters' hat.

- Die Spannungsauflösung findet ihre Grenze in der endlichen Meßzeit. Im Gegensatz zu direkten Messungen ist sie nicht durch zugemischtes Rauschen begrenzt: durch Erhöhung der Zyklenzahl können Rauschanteile in der gemessenen Spannung stets weiter reduziert werden. Eine Erhöhung der Zyklenzahl bedeutet aber immer eine Erhöhung der Gesamtmeßdauer. Damit werden unvermeidlich immer höhere Anforderungen an die Langzeitstabilität des gesamten experimentellen Aufbaus gestellt: jede Änderung -z.B. Drift- im Signalentstehungs- und -verarbeitungsprozeß führt dazu, daß nicht mehr exakt die gleichen Zeit-Spannungs-Kurven gemittelt werden, so daß das Ergebnis nicht mehr den Ablauf eines wohldefinierten Ereignisses wiedergibt, sondern den Mittelwert über unterschiedliche, vielleicht stark voneinander abweichende Ereignisse.
- Die oben erläuterten Effekte vermindern und begrenzen nicht nur Zeit- und Spannungsauflösung, sondern sie vermindern auch die absolute Genauigkeit der Spannungsmessung: werden beim Messen durch instabile Parameter z.B. zwei verschiedene Spannungskurven, die mit gleicher Häufigkeit auftreten, gemischt, so werden die bei den Messungen akkummulierten Werte durch die Gesamtzahl der Zyklen dividiert, obwohl keine der Kurven so oft aufgezeichnet wurde. Das ergibt für beide Kurven eine Abweichung des Meßergebnisses von 50% nach unten. Für andere Kurvenzahlen und Häufigkeiten ergeben sich entsprechend andere Minderungen der Spannungswerte pro Kurve. Dieser Fehler kann im allgemeinen nicht korrigiert werden, da nur die gemischte Summe der verschiedenen Kurven als Ergebnis erscheint und meist keine Information über die Häufigkeit der verschiedenen Kurven vorliegt.

2.2.3 Realisierungsmöglichkeiten und Folgeprobleme

Die wichtigste Voraussetzung für die Anwendbarkeit der Signalmittelung ist die willkürliche Wiederholbarkeit des zu messenden Ereignisses. Dies wird im allgemeinen dadurch erreicht, daß es durch das Schalten eines Parameters ausgelöst wird. Beispiele hierfür sind Anwendung eines Strompulses, eines Lichtpulses.

Als zweites muß eine Möglickeit bestehen, mit jedem Ereignis eine Aufzeichnug zu starten. Bei Signalen, die vom Rauschen verdeckt sind, ist dies nicht durch internes Triggern möglich, so daß das ereignisauslösende Gerät gleichzeitig die Aufzeichnung starten muß. Bild 2.4 zeigt schematisch die typische Anordnung.

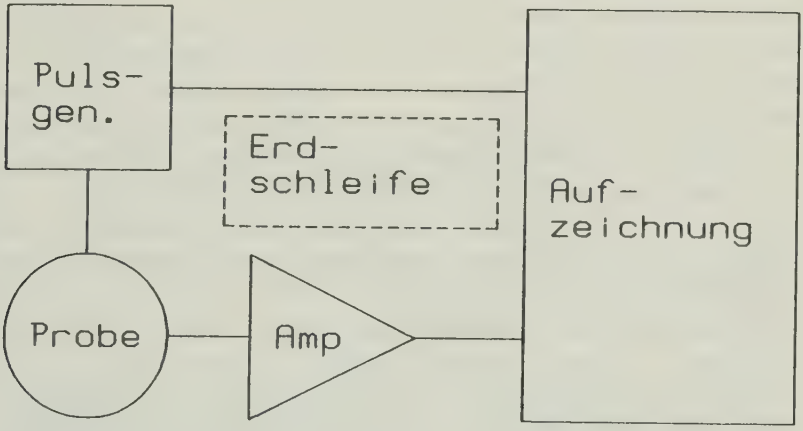


Bild 2.4: Entstehung einer Erdschleife
bei gepulsten Experimenten

Mit diesem Aufbau treten zwei neue Probleme auf:

- Bei fast allen Experimenten, bei denen das Ereignis elektrisch ausgelöst wird, entsteht zwangsläufig eine Erdschleife. Ohne die Anwendung spezieller Schutzmaßnahmen werden dem Signal dadurch zusätzliche, meist große Störungen überlagert. Sie können so groß

sein, daß z.B. das gesamte Verstärkersystem übersteuert wird oder die Empfindlichkeit des Meßgerätes untragbar stark reduziert werden muß.

Sind die Störungen nicht so stark, so können sie prinzipiell durch eine Erhöhung der Zyklenzahl pro Mittelungsmessung unterdrückt werden: sie sind i.a. nicht mit der Wiederholung des Ereignisses synchronisiert, so daß sie im Zusammenhang mit der Mittelung einfach als Rauschen betrachtet werden können. Natürlich erhöht das die Gesamtmeßdauer und so muß man von Fall zu Fall entscheiden, ob dieser einfache Weg gangbar ist oder aufwendigere Maßnahmen getroffen werden müssen.

- Da es keine idealen Erdleitungen und Abschirmungen gibt, tritt bei dieser Anordnung meist ein Übersprechen von den Leitungen, über die das Ereignis ausgelöst wird, auf die Signalleitungen auf (Pick-up). Die Grösse und die Form des Pick-up hängen stark von der Geometrie der Kabelführung und der Art der Kopplung zwischen Ein- und Ausgangsseite der Probe ab. Es hat oft die gleichen Probleme wie eine Erdschleife zur Folge. Treten diese nicht so drastisch wie bei den Erdschleifen auf, so dominiert es oft noch die zu messende Signalspannung und macht so eine Messung unmöglich oder schränkt den ausmeßbaren Zeitraum ein /16/.

Im Gegensatz zum Rauschen und allen nicht synchronen Störungen wird diese Störung nicht durch den Mittelungsprozeß reduziert: sie ist ja -wie das gesuchte Signal- vollständig mit der Aufzeichnung synchronisiert und interferiert daher bei der Summation nur konstruktiv.

Überlappen sich nun Signal und Störung zeitlich, so kann das Signal durch einfache Messungen nicht von den Störungen getrennt werden. Abhilfe ist hier nur möglich, wenn es gelingt, die Störungen unabhängig vom Signal aufzuzeichnen und von einer Messung mit Signalanteil zu subtrahieren (Differenzmessung, Base-Line-Sampling). Dabei ist darauf zu achten, daß die Pick-up-Aufzeichnug wirklich das gleiche Pick-up registriert, das auch bei der Messung mit Signalanteil auftritt, beide Aufzeichnungen

mit der gleichen hohen Auflösung gemacht werden und die Differenzbildung mit einer Genauigkeit erfolgt, die der Auflösung angepasst ist.

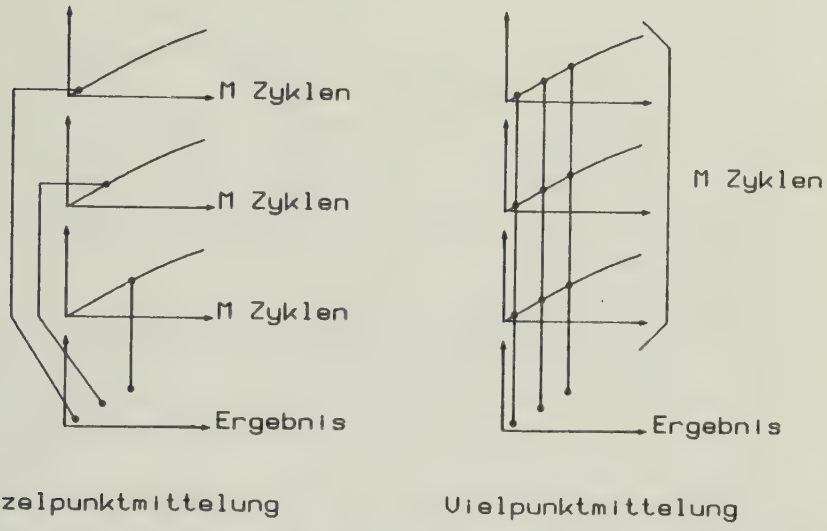


Bild 2.5: Einzelpunkt- und Vielpunktmittelung

Bei der Mittelung selbst gibt es zwei verschiedene Vorgehensweisen:

- Einzelpunkt-Mittelung (Single-Point-Averaging)

  Pro Experiment-Zyklus wird der Spannungswert zu einem einzigen Zeitpunkt gemessen. Dies wird so lange wiederholt, bis die fürs Mitteln nötige Zyklenzahl erreicht ist und somit ein Spannungwert des Endergebnisses erstellt ist. Dieser wird dann angezeigt und der Zeitpunkt der Einzelspannungsmessung wird um ein Abtastintervall verschoben. Dann wiederholt sich der Vorgang (Bild 2.5). Durch das jeweilige Verschieben des Abtastzeitpunktes wird nach und nach die gesamte Kurve erfasst.

Sollen nun M Zyklen einer Meßkurve mit N Abtastintervallen Dauer gemittelt werden, so müssen beim geschilderten Ablauf M*N Meßzyklen durchgeführt werden.

Dieses Vorgehen ist typisch für sogenannte Box-Car-Integratoren. Bei ihnen wird zum Zeitpunkt des Messens für die Dauer eines Abtastintervalls ein elektronisches Spannungstor geöffnet und mit der anliegenden Spannung ein Kondensator aufgeladen. Wird dies oft wiederholt, gleichen sich die Lade- und Entladevorgänge auf Grund der Rauschspannung in etwa aus, es bleibt die auf Grund des konstanten Signalanteils akkumulierte Ladung.

- Viel-Punkt-Mittelung (Multi-Point-Averaging)

Hier wird pro Zyklus die gesamte Meßkurve aufgezeichnet und gespeichert. Dazu werden N Speicher für die Spannungswerte der N Abtastintervalle benötigt. Beim nächsten Zyklus werden wieder N Werte gewonnen und zu den bereits gespeicherten Werten addiert. Ob die Addition immer sofort nach der Messung eines Punktes erfolgt oder zuerst alle N Werte aufgezeichnet und anschliessend addiert werden, hängt vom Aufbau des Gerätes ab. Bei kurzen Abtastintervallen reicht allerdings meist die Zeit nicht, um die Additon sofort durchzuführen.

Für die oben als Beispiel genannte Messung werden hier genau M Meßzyklen benötigt.

Typische Vertreter dieser Methode sind die digitalen Multipoint-Averager und Kombinationen von Transientenrekordern mit Prozeßrechnern. Die Spannungswerte werden digital gemessen und in digitalen Speichern abgelegt. Bei den integrierten Geräten wird die Addition von einer eigenen Arithmetikeinheit ausgeführt, bei den Kombinationsgeräten vom Rechner, der auch jeweils die Summationsresultate speichert, während der Rekorder nur jeweils eine einzige Aufzeichnung speichert.

Bei der Anwendung der digitalen Meßtechnik treten weitere Folgeprobleme auf:

- Jede Art von Digitalisierung ergibt zwangsläufig eine Einschränkung im Wertevorrat der möglichen Meßergebnisse , es werden ja immer ganze Werteintervalle auf einen einzigen Zahlenwert projeziert. Dies wird besonders deutlich bei schnellen Analog-Digital-Wandlern mit nur wenigen Ziffern (Bit) Genauigkeit. Es stellt sich also die Frage, ob mit dieser Technik extrem kleine Spannungen überhaupt erfasst und dargestellt werden können.
- Da bei der Digitalisierung jeweils ganze Werteintervalle auf eine einzige Zahl projeziert werden, ist es fraglich, ob das Mitteln mehrerer Messungen überhaupt zu einem neuen, genaueren Ergebnis führt: die wiederholte Addition eines immer wieder gleichen Wertes und die anschliessende Division durch die Zyklenzahl liefern kein anderes Resultat als wieder den Wert selbst.

Es liegt in der Natur der Darstellung von Zahlen mit endlicher Stellenzahl, daß immer nur ein endlicher Wertevorrat gegeben ist und es somit auch eine kleinste darstellbare Differenz zweier Werte gibt. Zur Erfassung eines Spannungwertes bei einer Einzelmessung ist also ein Spannungshub von mindestens einer Ziffer an der letzten Stelle nötig. Daran ändert auch wiederholtes Messen nichts und aus dieser Sicht ist ein digitalisierendes Meßgerät für hochauflösende Messungen ungeeignet. Wie weiter unten gezeigt wird, kann diese Grenze der Digitaltechnik aber unter bestimmten Voraussetzungen überwunden werden.

Das Problem des Wertevorrates löst sich bei Mittelungsmessungen von selbst: bei der einzelnen Messung ist der Wertevorrat wirklich auf die geringe Stellenzahl des Wandlerwertes eingeschränkt. Bei einer Mittelungsmessung werden aber viele Meßwerte addiert, so daß die Anzahl der möglichen Ergebnisse mit der Zyklenzahl steigt. Der Wertevorrat kann also durch die Wahl der Zyklenzahl immer groß genug gemacht werden. Offen bleibt bei dieser Überlegung, ob diese möglichen Werte jemals angenommen werden und ob sie dann

sinnvoll interpretierbar sind.

Wie schon oben ausgeführt, ist die Mittelung über feste Werte nicht sinnvoll, es entsteht kein neues, besseres Ergebnis. Das geschieht bei wiederholten Messungen aber nur dann, wenn sich das Signal durch ein sehr gutes Signal-Rausch-Verhältnis auszeichnet. Der Anwendungsbereich der Mittelung aber liegt bei verrauschten Signalen. In diesem Fall ist sofort klar, daß wiederholtes Messen jeweils einen anderen Wert liefert, der Mittelungsprozeß also nicht immer wieder die gleiche Zahl verarbeitet.

Jeder der verschiedenen Werte setzt sich aus Rauschen und Signal zusammen, wobei der Signalanteil konstant, der Rauschanteil stark variierend ist. Setzt man also -diese Bedingung ist nicht endgültig, siehe unten- ein Rauschen und einen Signalspannungshub von je mindestens einer kleinsten Ziffer Höhe voraus, so daß beide Teile sicher aufgelöst werden können, so wirkt die Mittelung mit Digitalgeräten genauso wie gewünscht: der konstante Teil des Signals interferriert konstruktiv, der variierende destruktiv. In diesem Fall kann auch jeder Wert des oben erwähnten großen Wertevorrates angenommen und problemlos als Spannungswert interpretiert werden.

Dieser Gedankengang macht die Verwendbarkeit der Digitaltechnik für Mittelungsmessungen auf anschauliche Weise verständlich, er führt aber zu strengeren Voraussetzungen als nötig. Danach wäre eine Signalspannung nur dann erfassbar, wenn sie mindestens auf den Hub des Digitalisierungsabstandes hochverstärkt werden kann, was in der Praxis zu erheblichen Schwierigkeiten führen kann.

Daß diese Einschränkung nicht wirklich nötig ist, zeigt sich, wenn man den Meßprozeß unvoreingenommen betrachtet: der Digitalisierer mißt einfach eine stark rauschende Spannung, er kann nicht zwischen Rauschanteil und Signalanteil unterscheiden. Die Mittelung über viele Messungen ergibt also einfach den Mittelwert eines Rauschens.

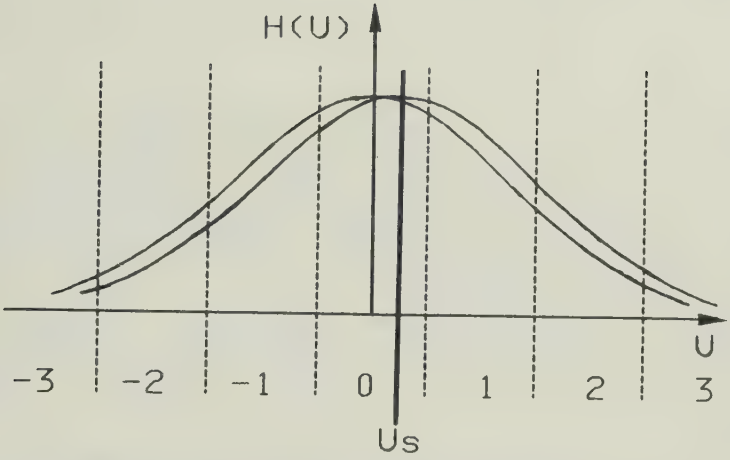


Bild 2.6: Messung von Spannungen unterhalb der Quantisierungsgrenze des Digitalisierers durch Mittelungsmessungen.

Für reines Rauschen erwartet man im Mittel gleich große und gleich häufige positive und negative Spannungswerte, so daß der Mittelwert Null ergibt. Sobald aber eine konstante Spannung zum Rauschen addiert wird, ist die Verteilung der Meßwerte nicht mehr so ausgeglichen. Die Häufigkeit der Spannungwerte nimmt auf der einen Seite ab, auf der anderen zu (siehe Bild 2.6). Der Mittelwert ist also sicher nicht mehr Null, sondern in Richtung der konstanten Spannung verschoben.

Damit ist die Messung eines sehr kleinen Spannungswertes zurückgeführt auf die genaue Messung eines Mittelwertes (Auflösungsverbesserung /17/). Diese Messung kann aber auch mit der Digitaltechnik prinzipiell beliebig genau durchgeführt werden, indem die Stichprobengrösse, d.h. die Zyklenzahl, entsprechend angehoben wird.

Als einzige Bedingung für die Anwendbarkeit der Digitaltechnik bei Mittelungsmessungen bleibt also, daß das Rauschen die Auflösungsgrenze des Digitalisierers überschreitet (*).

2.3 DER AUFBAU DER ANLAGE

2.3.1 Auswahl der Meßtechnik

Wie beschrieben, kann das Mittelungsverfahren sowohl in analoger als auch in digitaler Technik realisiert werden. Die Arbeitsbereiche der beiden Techniken überschneiden sich, prinzipielle Unterschiede bestehen in den Bereichen sehr hoher Zeitauflösung , großer Langzeitstabilität und der Speicherung der erstellten Datensätze.

Hohe Zeitauflösungen bis in den Bereich einiger zehn Picosekunden bieten die Analoggeräte, während die digitalen Geräte nur bis in den Bereich einiger Nanosekunden verwendbar sind.

Bei der Langzeitstabilität hingegen nehmen die Digitalgeräte die Spitze ein: aufgrund der digitalen Verarbeitung der Spannungswerte unterliegen sie nicht einer Drift oder anderen störenden Einflüssen, die bei Analoggeräten unvermeidbar sind.

Die Speicherung der Datensätze erfolgt bei Analoggeräten typischerweise als Meßkurve auf Papier oder ähnlichem Medium, während bei digital arbeitenden Geräten die Speicherung auf rechnerlesbaren Medien (Halbleiterspeicher, Platte, Band) typisch ist. Somit ist bei Analoggeräten das Ergebnis z.T. schneller verfügbar, ist aber für eine automatisierte Weiterverarbeitung (z.B. Fouriertransformation) weit weniger geeignet als die Ergebnisse von Digitalgeräten.

Ein weiterer Unterschied durch die Speichermedien ergibt sich in der Genauigkeit der Speicherung. Die digitale Speicherung bringt keinerlei Genauigkeitsverlust mit sich. Es können z.B. bereits abgespeicherte Meßkurven mit der vollen Genauigkeit voneinander subtrahiert werden, um etwa einen störenden Untergrund zu unterdrücken. Solch eine Differenzmessung kann mit Analoggeräten nur bei gleichzeitiger Verfügbarkeit von Signal und Referenz, z.B. signalfreiem

(*) Selbst diese Bedingung ist keine echte Einschränkung, da sie jederzeit durch das Zumischen eines geeigneten Rauschens oder äquivalenter Spannungen erfüllt werden kann.

Pick-up, realisiert werden, da ein nachträgliches Subtrahieren von Meßkurven auf dem Papier meist nicht mit ausreichender Genauigkeit erfolgen kann.

Da die Zeitauflösung des zur Verfügung stehenden Transientenrekorders BIOMATION 8100 für das geplante Experiment durchaus ausreichend war, dabei wegen des Übersprechens eine hochpräzise Differenzmessung durchgeführt werden mußte, und zudem der Aufbau der Meßanlage zugleich möglichst viele Optionen für andere Experimente mit eventuell weitergehenden Nachverarbeitungsbedürfnissen offen lassen sollte, wurde die Meßanlage in digitaler Technik verwirklicht.

2.3.2 Die Komponenten der Anlage

Die zentralen Komponenten der Signalmittelungsanlage sind der Transientenrekorder und der Prozeßrechner.

Der Transientenrekorder ist in seiner Funktion einem Speicheroszillographen vergleichbar (siehe Bild 2.7): nach dem Einschalten der Aufzeichnungsbereitschaft (Armierung, siehe unten) wartet das Gerät auf ein Triggersignal, bei Eintreffen des Triggersignals wird ein bestimmter Zeitabschnitt der Eingangsspannung aufgenommen und gespeichert, dann schaltet das Gerät in einen Wartezustand, der es erlaubt, die gespeicherten Werte aus- bzw. abzulesen. Der Wartezustand wird durch das Armierungssignal beendet: es gibt den Speicher für eine neue Aufzeichnung frei und versetzt das Gerät wieder in Aufzeichnungsbereitschaft.

Tabelle 2.1 zeigt die unterschiedlichen Realisierungen der wichtigsten Komponenten bei Speicheroszillograph und Transientenrekorder. Die grundsätzlich andere Arbeitsweise (digital/analog) ergibt natürlich eine Vielzahl von Detailunterschieden, die hier nicht besprochen werden sollen. Es sei aber auf einen prinzipiellen funktionalen Unterschied hingewiesen: die digital gespeicherte Information ist innerhalb des Speichers verschiebbar - im Gegensatz zu der Information in einem beschriebenen Analogspeicherschirm.

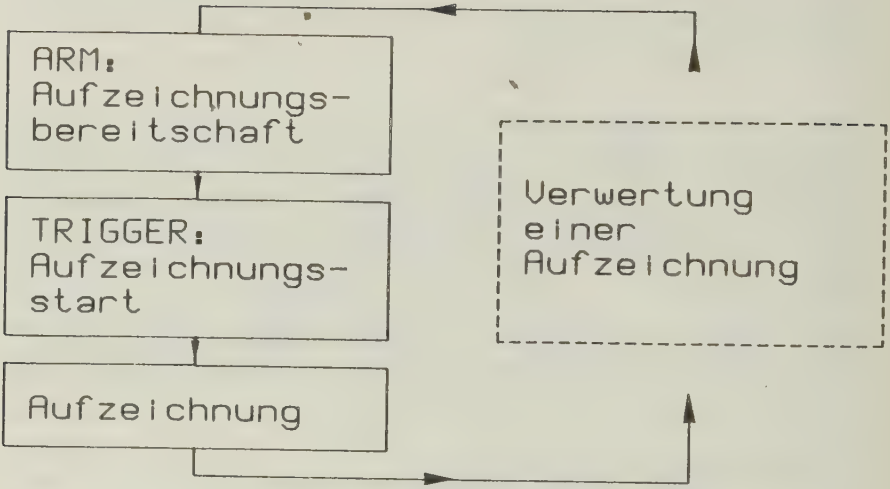


Bild 2.7: Arbeitszyklus eines Speicheroszilloskops

Damit kann der Transientenrekorder im sogenannten Pretriggermode betrieben werden, mit dem Signale, die zeitlich vor dem Triggerereignis liegen, aufgezeichnet werden können (siehe Anhang A.2).

	Spannungs-messer	Speicher-medium	Auslese-möglichkeiten
Speicher-oszillograph	analog: Ablenkung e-Strahl	Schirm der Röhre	Ablesen, Abfotografieren
Transienten-rekorder	digital: ADC	digitaler Speicher	Oszillograph über DAC, digitaler Datentransfer

Tabelle 2.1:
Gegenüberstellung Transientenrekorder - Speicheroszillograph

Der eingesetzte Rekorder BIOMATION 8100 hat ein minimales Abtastintervall von 10 ns (Abtastrate 100 MHz) und einen minimalen Eingangsspannungsbereich von +/- 50 mV. Sein Speicher kann bis zu 2024 gültige Meßwerte à 8 Bit aufnehmen /27/.

Ein Prozeßrechner ist ein allgemein verwendbarer digitaler Rechner, der einerseits nicht auf eine einzige spezielle Aufgabe fixiert, andererseits aber für die effektive Bearbeitung von Echtzeitaufgaben konzipiert ist. Durch seine innere Struktur ist er also geeignet, äußere Signale aufzunehmen und in Echtzeit, d.h. meist möglichst schnell, darauf zu reagieren, also Signale an die Umgebung zu geben.

Bei Mittelungsmessungen ist seine Hauptaufgabe das Mitteln der Meßkurven. Dazu muß er das 'Aufzeichnung fertig'-Signal des Rekorders registrieren, dann die Einzelaufzeichnung einlesen und speichern bzw. addieren und anschliessend den Rekorder armieren. Er füllt also den Platz 'Verwertung einer Aufzeichnung' im Bild 2.7.

Die Leistungsfähigkeit des eingesetzen Rechners PDP 11/04 lässt sich in etwa durch die typischen Befehlsausführungszeiten charakterisieren: sie reichen von 1-4 µs für eine Operation und zusätzlichen 1-5 µs für die Adressierung eines Operanden /20/.

Das bei dieser Arbeit eingesetzte Betriebssystem, RT-11, unterstützt seine Prozeßrechnereigenschaften: es ist ein Ein-Benutzer (Single-User) Betriebssytem mit einfacher, schneller Struktur. Der Betrieb durch einen einzigen Benutzer hat gegenüber einem Viel-Benutzerbetrieb den Vorteil, daß der eine Benutzer den gesamten Betrieb, insbesondere den zeitlichen Ablauf, vollständig kontrollieren kann, weil zeitaufwendige Synchronisationsprozesse mit anderen Benutzern entfallen.

Offensichtlich ist dieser Kern einer Signalmittelungsanlage nicht geeignet, Messungen effektiv durchzuführen: es fehlen Komponenten zur Signalerzeugung und zur Triggerung des Rekorders, zur Signalvorverarbeitung, zur Steuerung des

Meßvorgangs sowie zur Darstellung des Meßergebnisses. Dem entsprechend wurde dieser Kern durch folgende Komponenten zu einer voll funktionsfähigen Anlage ergänzt (siehe Bild 2.8):

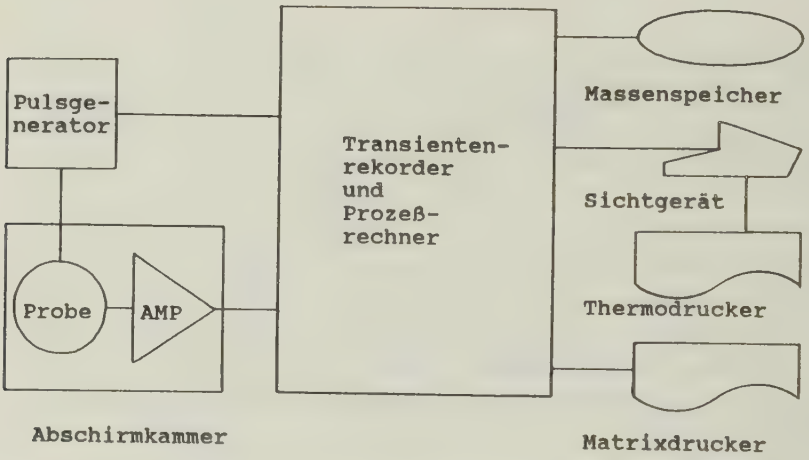


Bild 2.8: Die Komponenten der Meßanlage

- Signalerzeugung und Synchronisation

  Die repetierliche Signalerzeugung in der Probe kann grundsätzlich auf verschiedenste Weise erfolgen, nur die Synchronisation von Signalerzeugung und -aufzeichnung ist unabdingbar. Das hier behandelte Supraleitungsexperiment wird z.B. durch die Überlagerung eines Gleichstromes und eines Strompulses angesteuert.

  Als Gleichstromquelle wurde die Stromquelle 'Willi' (Bau: K.Selig, W.Metzger) mit Batterieversorgung eingesetzt. Sie liefert Ströme bis zu +/-500 mA und enthält zwei unabhängige Einstelleinheiten, zwischen denen manuell oder durch ein externes Signal gewählt werden kann.

  Zur repetierlichen Erzeugung des Strompulses und Synchronisation der Aufzeichnung wurde der Pulsgenerator PM 5715 eingesetzt. Er erlaubt eine unabhängige Variation von Amplitude und Ablaufzeiten, wobei jeweils Anstiegszeit, Dauer und Abfallzeit des Pulses sowie der

Pulsabstand und die Verzögerungszeit zwischen Triggersignal und Puls in weiten Grenzen unabhängig voneinander eingestellt werden können. Die einstellbaren Zeiten reichen dabei von einigen Nanosekunden (kürzeste Flanke) bis zu 100 ms (längster Pulsabstand); die Pulsamplituden bis zu 10 V bei 200 mA Ausgangsstrom.

- Signalvorverarbeitung

Die nötige hohe und breitbandige Verstärkung des Signals wurde durch die Kombination von zwei Breitbandverstärkern erreicht. Solch eine Kombination ist durch ihre hohe Verstärkung äußerst empfindlich gegen externe Störungen und Rückkopplungswege. Aufgenommene äußere Störungen erhöhen nicht nur das Rauschen, sie können bei entsprechend hoher Amplitude den Nachverstärker übersteuern und so den Betrieb der Anlage unmöglich machen; Rückkopplungswege führen sehr schnell zum Schwingen des Systems, womit der Betrieb ebenfalls unmöglich gemacht wird.

Diese Probleme konnten durch den Einbau des Kryostaten und des Vorverstärkers in eine Abschirmkammer gelöst werden: sie schützt alle probennahen Leitungen und den Vorverstärker vor Einstrahlungen externer Störquellen und verhindert zugleich ein Rückkoppeln des verstärkten Signals auf den Vorverstärker über unvermeidbare Erdschleifen /21/. Zusätzlich wurde innerhalb und außerhalb der Abschirmkammer der Widerstand der unvermeidbaren Erdschleifen für unsymmetrische Ströme durch Symmetrierglieder in jedem Leitungspaar stark erhöht.

Die Vorverstärkung erfolgte mit einem rauscharmen Breitbandverstärker TRONTECH W20ATC, die Nachverstärkung mit einem Breitbandverstärker AVANTEK 461/462/463. Der Vorverstärker ist in der Abschirmkammer plaziert, der Avantek nahe beim Eingang des Transientenrekorders. Die Daten der Verstärker zeigt Tabelle 2.2.

Verstärkerdaten

	TRONTECH	AVANTEK
Verstärkung	54dB	40dB
Bandbreite (-3dB)	6kHz-60MHz	90Hz-500MHz
Eingangsrauschen	8μV	100μV
-"- $/\sqrt{Hz}$	1.6nV	4.5nV

Tabelle 2.2: Daten der eingesetzten Verstärker

Die Abschirmkammer wurde in den Werkstätten des Physikalischen Instituts gebaut. Es ist eine doppelwandige Kammer von 1x1 m^2 Grundfläche und 2 m Höhe aus Kupferblech (0.5mm Dicke, 30mm Abstand). Sie besteht aus 6 Teilen, von denen für Arbeiten am Kryostaten nur der Deckel und ein Eckelement abgenommen werden müssen. Sie erbringt eine Dämpfung externer Störungen um mindestens 20 dB, was -wie die Praxis zeigte- hier ausreichend war.

- Steuerung und Ergebnisdarstellung

Die Mittelungsfunktion des Prozeßrechners muß in den Gesamtablauf des Experiments integriert werden (Bild 2.9). Sie muß gestartet und nach ausreichender Zyklenzahl gestoppt werden. Danach liegt das Meßergebnis im Speicher des Rechners, es muß noch sichtbar gemacht werden. Da der Rechner ein Vielzweckrechner ist, kann er diese Funktionen bei entsprechender Ausstattung mit Peripheriegeräten selbst ausführen. Es sind also Ein/Ausgabe-Einheiten für Befehle des Experimentators und zur Darstellung des Meßergebnisses erforderlich.

Hier wurden das Sichtgerät HP2648A und der Drucker HP2671G verwendet. Das Sichtgerät ist graphikfähig und enthält komfortable Graphikfunktionen (Autoplot), die die Entwicklung der nötigen Software stark vereinfachten. Der Drucker ist lokal, d.h. unabhängig vom Prozeßrechner, an das Sichtgerät angeschlossen und dient als Hardcopy zum Terminal. So können die Bilder vom Sichtgerät direkt auf Papier fixiert werden.

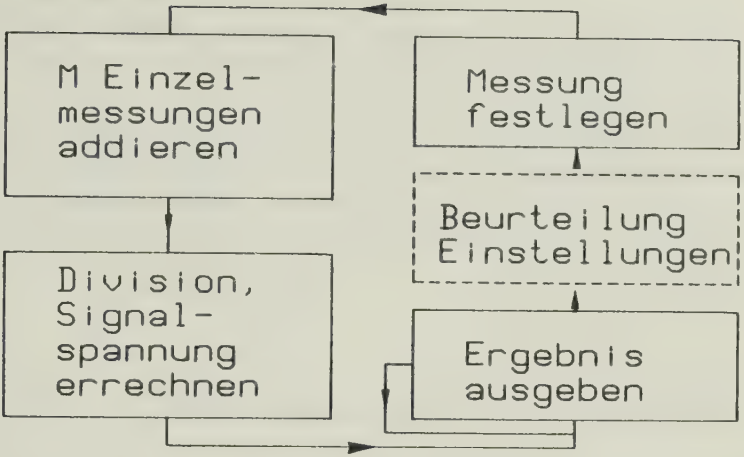


Bild 2.9: Arbeitszyklus des Prozeßrechners bei Mittelungsmessungen

- Langfristige Speicherung und Protokollausgabe

  Prinzipiell ist die Meßanlage auch ohne solche Komponenten betreibbar. Ihr Fehlen schränkte die Nutzungsmöglichkeiten aber stark ein: mit jeder neuen Messung würde die letzte Messung überschrieben, als einziges Ergebnis läge die Hardcopy vor. Damit wäre jede Art von weiterer Verarbeitung (Optimierung der Darstellung, digitales Filtern, Fouriertransformation) stark erschwert. Die langfristige Speicherung auf rechnerlesbaren Datenträgern dagegen läßt alle Möglicheiten offen, ohne Einschränkungen im Betrieb mit sich zu bringen.

  Ähnlich steht es mit der Protokollausgabe: im Protokoll können Experimentverlauf und Meßparameter festgehalten und später eingesehen werden, ohne sonstige Leistungen zu beeinträchtigen. Das erspart viel handschriftliches Notieren während des Experiments und das ausgedruckte Protokoll bildet eine gute, leicht handhabbare Grundlage für Auswertung und Diskussion der Ergebnisse.

Der apparative Aufwand steigt durch die Berücksichtigung dieser Möglichkeiten nicht: für einen effektiven Betrieb (Entwicklung und Einsatz) des Prozeßrechners braucht man sowieso Massenspeicher und Drucker.

Für den Systembetrieb und die langfristige Speicherung wurde ein DSD 440 eingesetzt. Dies ist ein Doppellaufwerk für 8-Zoll Disketten (double Density, single sided).

Für die Protokollausgaben wurde ein Drucker LA 36-II verwendet.

2.3.3 Die Verknüpfung der Komponenten

Wie allgemein zu erwarten und oben schon erwähnt (Abtasttheorem,Erdschleifen), erfordert die Verknüpfung von Komponenten zu einem Gesamtsystem oft noch spezielle Maßnahmen. Im Folgenden werden die entsprechenden Probleme aufgegriffen und ihre Lösung beschrieben. Dabei wird die Verdrahtung der Verstärkeranlage und die Kabelführung innerhalb der Abschirmkammer nicht mehr diskutiert, da sie bereits oben (Verstärkeranlage) beschrieben wurden.

2.3.3.1 Strompulsversorgung - Probe,Signalaufzeichnung

Die Problematik dieses Anschlußes liegt in der Erzeugung von Erdschleifen (siehe Bild 2.4). Hier zeigte sich bei unserem Aufbau, daß zwischen lokalen Erdschleifen und Erdschleifen, die durch die Schutzleiter des Netzes geschlossen werden, unterschieden werden kann.

"Große" Erdschleifen über den Netzschutzleiter führen zu so großen Störungen des Signals, daß die Verstärkerkombination übersteuert wird, d.h. so nicht eingesetzt werden kann. Lokale Erdschleifen hingegen erhöhen zwar das Rauschen in der Signalleitung - je nach Lage und Größe mehr oder weniger -, lassen aber den Betrieb der Verstärkeranlage zu.

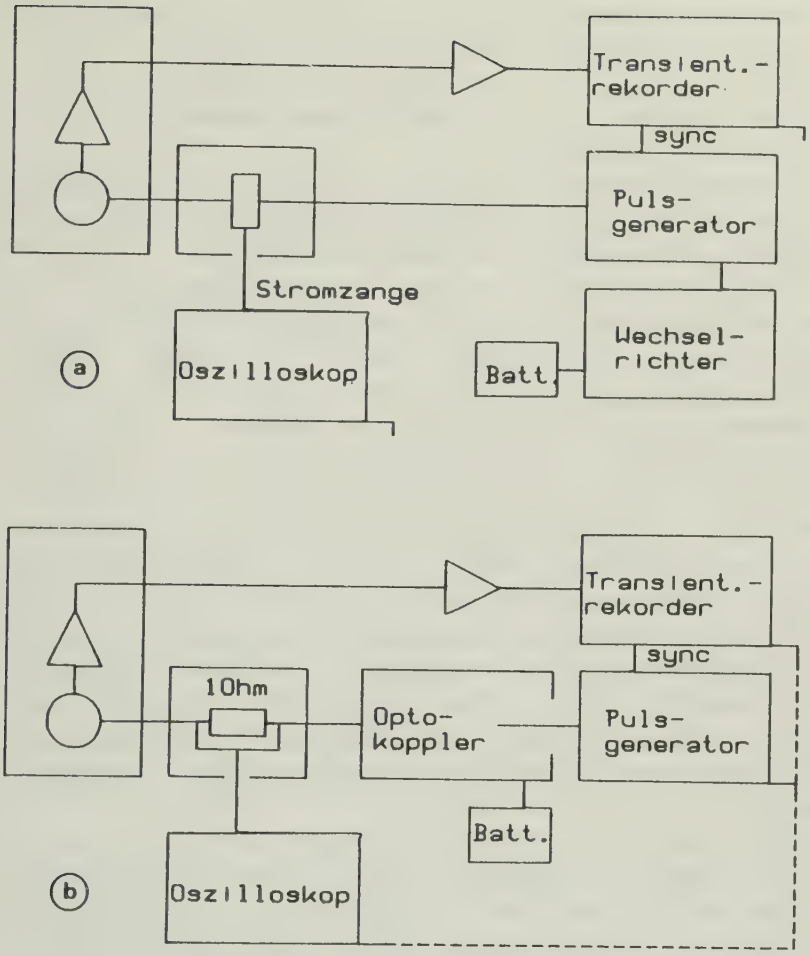


Bild 2.10: Lösungen des Erdschleifenproblems

Das Problem der Netzerdschleifen wurde auf zwei Arten gelöst (Bild 2.10). Teilbild a zeigt die Lösung, die bei der Anwendung kurzer, steiler Pulse eingesetzt werden kann. Der Pulsgenerator wird über einen Wechselrichter von einer Batterie versorgt. Damit bleibt nur noch die lokale Erdschleife Pulsgenerator-Synchronisationsleitung-Rekorder-

Verstärker-Abschirmkammer-Pulsleitung-Pulsgenerator geschlossen. Die Messung der Strompulshöhe erfolgt mit einer Stromzange, die keine galvanische Verbindung mit der Pulsleitung hat und die während der Signalmessung aus der Leitung entfernt werden kann.

Nachteil dieses Verfahrens ist die begrenzte Betriebsdauer (2-3 Stunden mit einer 70 Ah-Batterie) und die mögliche Einstreuung von Störungen durch den Wechselrichter.

Teilbild b zeigt die bei relativ langen Strompulsen mit flachen Flanken (Anstiegszeit > 2µs) günstigere Anordnung. Hier kann ein batteriebetriebener Optokoppler mit Nachverstärker (Schaltung siehe Anhang A.3) zwischen Pulsgenerator und Probe geschaltet werden, der den Spannungspuls des Pulsgenerators analog in einen entsprechenden Strompuls umsetzt. Damit entsteht zwar eine Netzerdschleife, (Pulsgenerator-Synchronisationsleitung-Rekorder-Netzschutzleiter-Pulsgenerator), aber sie enthält nicht die Signalstrecke Probe-Verstärker-Rekorder, so daß sie praktisch keine Störungen verursacht. Natürlich ist die Trennung zwischen Probe und Pulsgenerator für hohe Frequenzen nicht vollkommen. Das äußert sich aber nur in einem erhöhten Rauschen bei angeschlossenem Pulsgenerator. Die erwähnten großen, jedoch niederfrequenten Netzstörungen kommen nicht zur Wirkung.

Da die Stromzange bei niedrigen Frequenzen nicht mehr einsetzbar ist, wird hier die Strompulshöhe durch den Spannungsabfall an einem 1 Ohm Widerstand gemessen. Dieser Abgriff schließt offensichtlich wieder eine Netzerdschleife, die die Signalstrecke enthält. Diese Verbindung muß also nach der Pulseinstellung wieder getrennt werden.

Ein weiteres Problem bei dieser (eingezeichneten) Meßmethode bilden die verschiedenen möglichen Stromwege bei angeschlossenem und nicht angeschlossenem Oszilloskop. Der entstehende Meßfehler der Stromhöhe ist aber kleiner als die Meßgenauigkeit der Strompulshöhe. Das wurde durch eine potentialfreie Messung verifiziert. Ein kleiner Fehler kann toleriert werden, da der Experimentverlauf des Supraleitungsexperiments nicht stark von der absoluten

Strompulshöhe abhängt.

2.3.3.2 Verstärkeranlage - Rekorder

Da die eingesetzten Verstärker in 50-Ohm Technik aufgebaut und somit mit dem Rekorder voll kompatibel sind, bleibt hier nur noch die Ausgangsspannung und die Bandbreite der Übertragungs- und Verstärkerstrecke an den Rekorder anzupassen.

Da beide Verstärker mit unveränderbaren Verstärkungsfaktoren arbeiten, wurde die Anpassung der Ausgangsspannung an den jeweiligen Meßbereich des Rekorders mit umschaltbaren Abschwächern (z.B. HP8494A, Wavetek 5010,5070,5080) vorgenommen. So konnte in den meisten Fällen die Auflösung des Rekorders von 8 Bit voll ausgenutzt werden.

Zur Bandbreitenanpassung wurde zunächst vor den Vorverstärker ein 25 MHz Tiefpass eingebaut, um höhere Frequenzen - seien sie Signal oder Rauschen - schon vor der Verstärkung stark zu dämpfen. So ist die Eingangseite der höchsten vom Rekorder verarbeitbaren Frequenz angepasst.

Die nach dem Abtasttheorem nötige Bandlimitierung der Eingangsspannung des Rekorders erfolgte durch einen Tiefpass, der zwischen Nachverstärker und Rekordereingang geschaltet wurde. Diese Stelle wurde ausgewählt um nicht nur das Signal, sondern auch das Verstärkerrauschen auf den jeweils verarbeiteten Frequenzbereich zu beschränken. Zudem sollte so der Austausch des Filters beim Einstellen einer anderen Zeitauflösung am wenigsten auf die Probe zurückwirken.

Alle erwähnten Filter sind selbstgebaute Doppel-T-LC-Filter mit ca 0.5 dB Betriebsdämpfung und einem Abfall von etwa 35 dB pro Oktave. Ihre Berechnung und der Aufbau ist im Anhang A.4 beschrieben.

2.3.3.3 Transientenrekorder - Prozeßrechner

Beim Anschluß des Rekorders an den Prozeßrechner geht es zunächst -wie bei allen Anschlüssen externer Geräte an Rechner- um die elektronische und logische Anpassung zweier nicht kompatibler Geräte. Es müssen Daten und Steuersignale aus dem Innern des einen Gerätes in das andere Gerät transportiert werden. Die Elektronik, die die nötigen elektrischen Umsetzungen und ggf. logischen Operationen durchführt, nennt man Interface. Sie ist auf der einen Seite auf den Rechner, auf der anderen Seite auf das externe Gerät abgestimmt.

Mit einem Interface sind die Hardwaregrundlagen für die Kommunikation zwischen Rechner und externem Gerät gegeben, für den Betrieb ist dann noch eine entsprechende Software, d.h. ein Programm, das diese Schnittstelle benutzt, erforderlich. Dies wird i.a. so realisiert, daß die Aufgabenstellung aufgeteilt wird in gerätespezifische Abläufe und das problemspezifische Prozeßprogramm. Das Prozeßprogramm aktiviert bei Bedarf die jeweiligen gerätespezifischen Abläufe, die dann -zusammengefaßt und ans Betriebssystem angepasst- als sogenannter Treiber (Driver,Handler) zur Verfügung stehen.

Beim Aufbau eines Echtzeitsystems können sich noch weitere einzuhaltende Bedingungen ergeben. So darf z.B. der Übertragungsprozeß zwischen Rechner und externem Gerät keinesfalls den echtzeitbezogenen Ablauf eines Prozesses behindern. Bei einer Signalmittelungsanlage bedeutet das, daß die Übernahme und Verarbeitung der Daten einer Einzelmessung mit ausreichender Geschwindigkeit erfolgen muß, da dies der zeitkritischste Teil des Meßprozesses ist. Andernfalls besteht die Gefahr verschlechterter Auflösung, weil die Gesamtmeßdauer zu groß wird oder - um gerade dies zu vermeiden - die Zyklenzahl herabgesetzt werden muß.

Eine maximale Verarbeitungsgeschwindigkeit wird natürlich durch eine auf Addition und Speicherung von Zwischenergebnissen spezialisierte Elektronik erreicht /22/. Sie erfordert aber im Vergleich mit einer Lösung, bei der der Prozeßrechner selbst diese Aufgaben erfüllt, einen wesentlich höheren Hardwareaufwand. Aufgrund der Ergebnisse früherer Experimente /16/ war bekannt, daß die Addiergeschwindigkeit des Rechners für das geplante Experiment ausreicht, so daß der Aufwand für eine eigene Arithmetikeinheit eingespart werden konnte.

Der Aufwand an neu zu entwickelnder Hardware konnte durch den Einsatz eines vorhandenen CAMAC-Systems weiter verringert werden. CAMAC ist ein Normensystem, in dem die beiden Seiten eines Interfaces in getrennten Geräten angeordnet sind, die über eine normierte Schnittstelle verbunden sind. Diese Trennung und die Auslegung der Schnittstelle für viele verschiedene Stationen auf der rechnerabgewandten Seite erlaubt es, bei einem einzigen rechnerspezifischen Interface-Modul viele (in einem Rahmen bis zu 23) verschiedene völlig rechnerunspezifische Geräte anzuschliessen.

Für die Kopplung des Transientenrekorders an den Prozeßrechner wurde ein CAMAC-I/O-Register verwendet (Bild 2.11). Das ist eine allgemein verwendbare Ein/Ausgabeeinheit für Daten, das zwei getrennte Datenkanäle enthält, einen zum Einlesen von Daten in den Rechner, das Input-Register, und einen zur Übertragung von Daten aus dem Rechner zu einem externen Gerät, das Output-Register. Jede Einheit besitzt ein eigenes Paar Datenaustauschsignale und ein zusätzliches statisches Steuersignal /28/.

Diesem I/O-Register steht auf der Rekorderseite eine Schnittstelle gegenüber, die zwar für Eingangsdaten (Befehle vom Rechner an den Rekorder) und Ausgangsdaten (Daten vom Rekorder zum Rechner) getrennte Leitungen, für die Steuerung aber nur ein Signalpaar hat, für Ein- und Ausgabe gemeinsam. Somit hängt die Bedeutung dieser Signale von der Datentransferrichtung ab. Speziell bei der Richtung vom Rekorder zum Rechner hängt die Bedeutung auch noch vom Betriebszustand des Rekorders ab (siehe Tabelle 2.3 /26,27/).

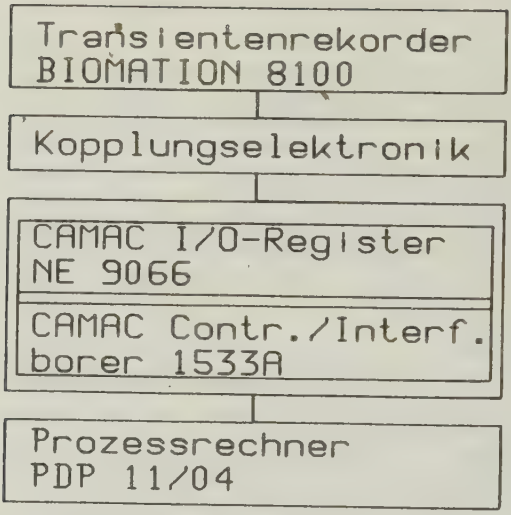


Bild 2.11: Blockschaltbild der Kopplung
Transientenrekorder - Prozessrechner

Außerdem benötigt der Rekorder für die korrekte Funktion der Schnittstelle einige funktionsabhängige statische Signale auf den Befehlsleitungen .

Die Hauptaufgabe der Kopplungselektronik besteht also darin, die nötigen statischen Signale bereitzustellen und die beiden Einheiten des Registers mit der einen Schnittstelle des Rekorders zu verbinden: die Steuersignale des Rekorders müssen dem Betriebszustand entsprechend mit der richtigen Einheit des I/O-Registers verbunden und die dazu gehörenden statischen Signale an die Befehlsleitungen angelegt werden (Bild 2.12, Tabelle 2.3).

Die realisierte Lösung geht davon aus, daß der Rekorder in der Hauptsache als Eingabegerät (Datentransport zum Rechner) arbeitet, während Befehle an den Rekorder relativ selten erfolgen. Deswegen wurde als Grundzustand der Kopplungselektronik die Verbindung des Rekorders mit dem Input-Register gewählt. So kann der Rechner direkt nach dem Einschalten den Betriebszustand des Rekorders abfragen und zugleich ist das Input-Register empfindlich für die Meldung

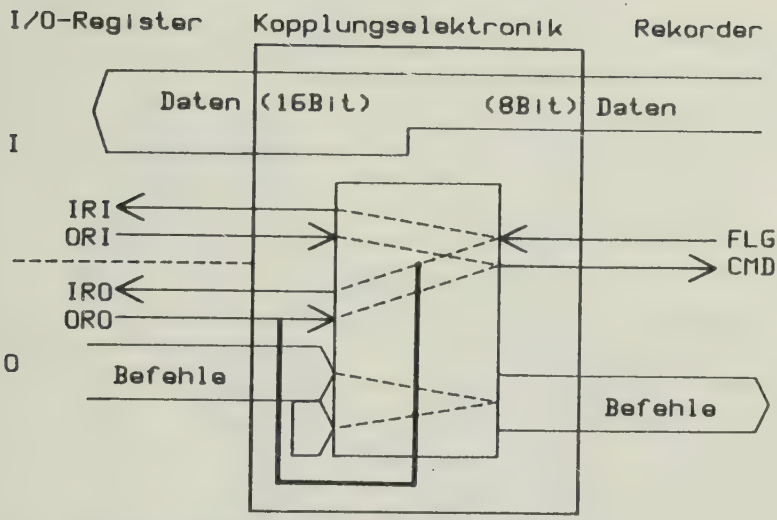


Bild 2.12: Prinzipschaltbild der Kopplung
Transientenrekorder - I/O-Register
(Signaldefinitionen siehe Tabelle 2.3)

'Aufzeichnung beendet'. Aus diesem Zustand kann durch das Umschalten der zwei statischen Steuersignale des I/O-Registers sofort zum Einlesen der Meßwerte übergegangen werden.

Das Umschalten der Kopplung auf die Verbindung Rekorder-Output-Register erfolgt, sobald der Rechner einen Befehl an den Rekorder absetzt: das Signal 'Ausgabedaten fertig' des Output-Registers selbst wird benutzt um die Befehls- und Steuerleitungen umzuschalten und wird erst dann, nach angemessener Wartezeit, an den Rekorder weitergegeben, wo es die Befehlsausführung im Rekorder auslöst. Dieses Signal wird vom Output-Register zurückgesetzt, wenn der Rekorder den Befehlsvollzug meldet. Durch die Kopplung der Umschalter an dieses Signal wird die Kopplungselektronik nach der Befehlsausführung automatisch wieder in den vorherigen Zustand zurückgeschaltet.

Signaldefinitionen

Input/Output-Register

IRI	Daten bereit	->	Input-Register
ORI	Daten übernommen	<-	Input-Register
ORO	Daten bereit	<-	Output-Register
IRO	Daten übernommen	<-	Output-Register

Transientenrekorder

Rekorder als Eingabegerät (Datenquelle)			
FLG	Aufzeichnung beendet	<-	Rekorder
	Datenwort bereit	<-	Rekorder
CMD	Datenwortanforderung	->	Rekorder
Rekorder als Ausgabegerät (Datensenke)			
FLG	Kommando angenommen	<-	Rekorder
	Kommando ausgeführt	<-	Rekorder
CMD	Kommando liegt an	->	Rekorder

Tabelle 2.3: Signaldefinitionen

Neben diesen zentralen Steuerungsaufgaben bewirkt die Kopplungselektronik noch die Anpassung der Darstellung der Rekorderdaten an den Rechner und meldet dem Rechner statisch, ob der Rekorder eingeschaltet ist. Die gesamte Schaltung ist im Anhang A.5 dargestellt und erläutert.

In diesem Anhang ist auch die zur Schnittstelle gehörige Software, die im folgenden nur kurz skizziert wird, beschrieben.

Sie besteht, entsprechend der oben beschriebenen funktionalen Aufteilung, aus einem Treiberunterprogrammpaket und dem eigentlichen Prozeßprogramm.

Der Treiber weist keine strukturellen Besonderheiten auf, weicht aber in den Einzelheiten von einem RT-11 Standardtreiber extrem ab. Er ist als Unterprogrammpaket, das in das Prozeßprogramm eingebunden wird, realisiert und beachtet die Systemkonventionen nur dort, wo dies zur Funktionssicherheit von Programm und System nötig ist. So konnte die Effizienz der Verbindung gegenüber einer

systemkonformen Lösung wesentlich erhöht werden: die üblichen Kontrollen und Abstimmungen mit anderen Systemteilen konnten eingespart, der zeitkritische Additonsprozeß auf direkteste Weise organisiert und die Schnittstelle zum Prozeßprogramm dem Rekorder optimal angepasst werden. Das gesamte Konzept konnte natürlich nur in einer Einzelbenutzerumgebung (siehe oben) realisiert werden.

Der Meßprozeß, der unter Verwendung des Treibers programmiert wurde, ist im Bild 2.13 dargestellt. Er wurde möglichst flexibel gehalten, um sowohl während eines speziellen Experiments, als auch beim Anschluß an andere Experimente ohne neue Programmierung optimale Meßabläufe zu ermöglichen. Zu Bild 2.13 bleibt zu ergänzen, daß die rechnergesteuerte Umschaltung ggf. über einen CAMAC-Digital-Analog-Converter erfolgt, (dessen Ausgang dafür entsprechend an den experimentellen Aufbau angeschlossen sein muß) und daß als Aufzeichnungsmodus der Pretriggermode gewählt wurde, so daß auch diese Möglichkeit des Rekorders genutzt werden kann. Eine Versorgung des Rekorders mit einem Arm-Signal entfällt, da die schnelle Additionsroutine im Treiber aus Zeitgründen den Auto-Arm Betrieb einstellt.

Alle anderen Aufzeichnungsparameter (Abtastintervall, Eingangsempfindlichkeit, Triggerdelay, Offsets) bleiben der manuellen Einstellung vorbehalten. So können sie mit Hilfe eines Oszilloskops, das den jeweiligen Speicherinhalt des Rekorders anzeigt, schnell und unter direkter Kontrolle des Ergebnisses eingestellt werden (*).

Im Anschluß an den Mittelungs- und ggf. Subtraktionsprozeß werden die gewonnenen Daten noch unter Verwendung der vom Benutzer eingegebenen Parameter Eingangsempfindlichkeit und

(*) Eine Einstellung des Rekorders, die über das Terminal gesteuert und vom Rechner vollzogen wird, ist zwar technisch möglich, aber hier nicht sinnvoll: die Darstellung des aktuellen Rekorderzustandes und der letzten Aufzeichnung auf dem Sichtgerät ist mit den eingesetzten Geräten bei den geplanten Anwendungen nicht in Echtzeit zu realisieren.

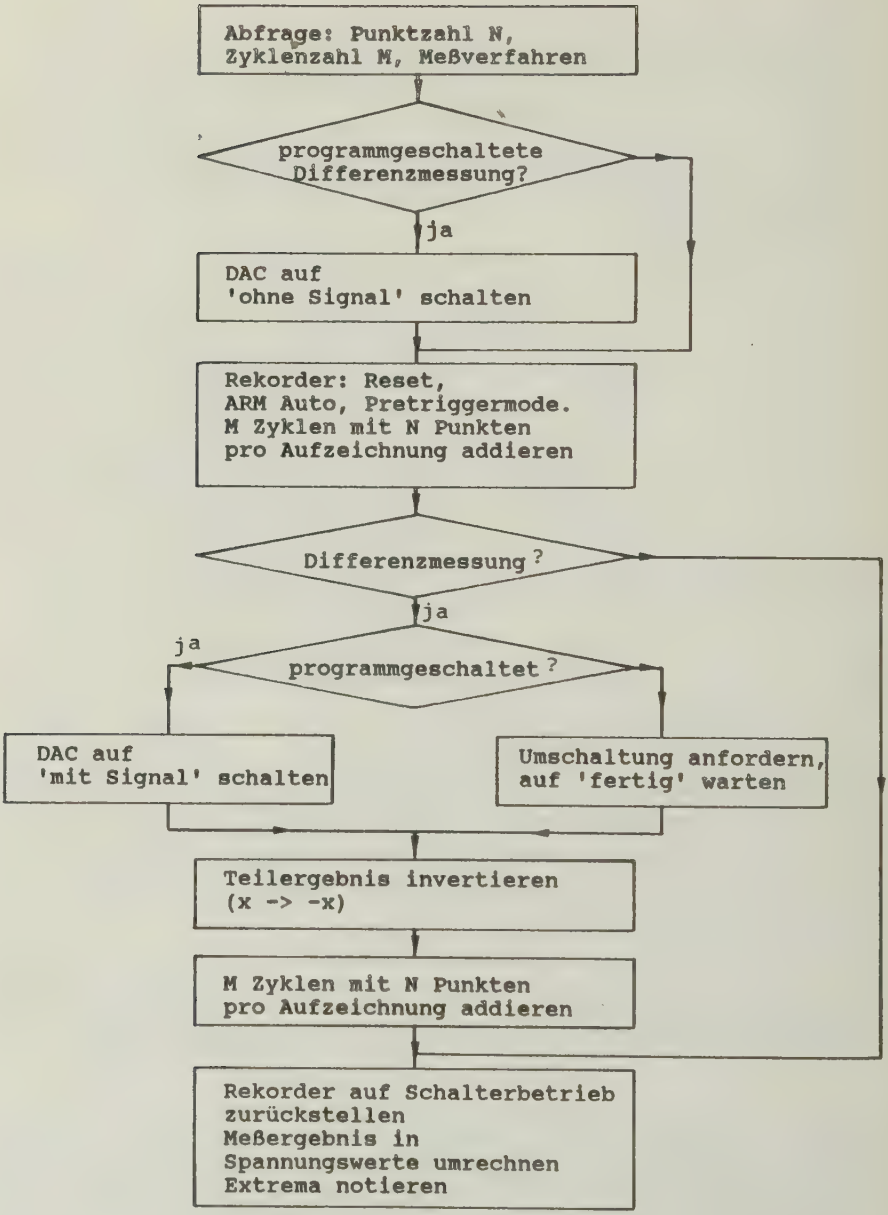


Bild 2.13: Flußdiagramm des Meßprozesses

Verstärkung in Spannungen umgerechnet. Dabei werden die Extrema der Zeit und der Spannung registriert , was eine anschliessende graphische Darstellung erleichtert. Der gesamte geschilderte Ablauf ist ein Teil des Meßprogramms, dessen Struktur im nächsten Punkt (Prozeßrechner-Standardperipherie) erläutert wird.

2.3.3.4 Prozeßrechner - Standardperipherie

Bei dieser Verbindung geht es, wie der Name Standardperipherie schon andeutet, nicht um eine elektronische Anpassung von Geräten, sondern um die Organisation der Datenflüsse von Gerät zu Gerät.

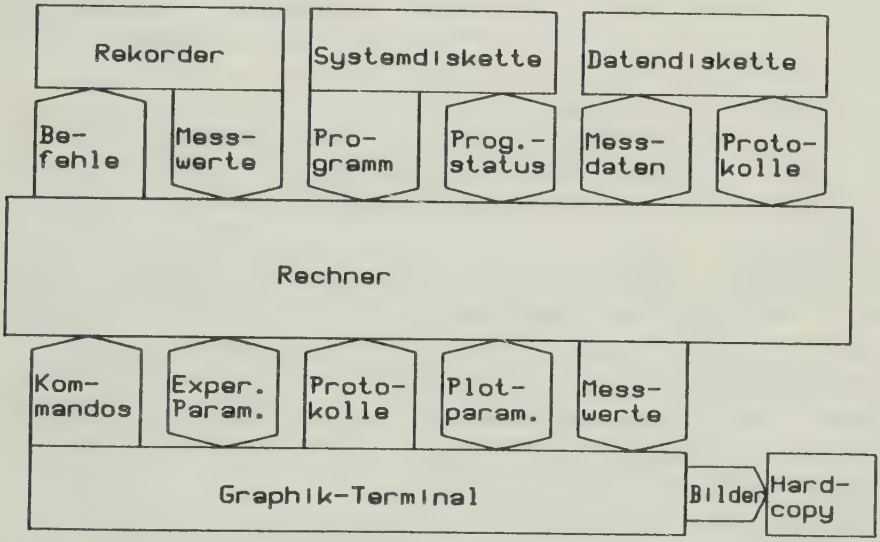


Bild 2.14: Datenflüsse des Meßprogramms

Die Datenflüsse beim Betrieb der Meßanlage sind im Bild 2.14 dargestellt. Ihm kann entnommen werden, welche Daten von welchem Gerät gespeichert und/oder verarbeitet werden. Es vermittelt auch einen Überblick über grundsätzliche Abläufe, wie z.B. Meßwerte aufnehmen -> Verarbeitung im Rechner ->

Speicherung des Ergebnisses auf Massenspeicher. Der genaue Ablauf, d.h. der dem Experiment angepaßte Einsatz der Geräte Terminal, Hardcopy, Massenspeicher und Drucker ist daraus nicht zu entnehmen.

Eine solche Darstellung ist bei dem realisierten System auch nicht sinnvoll. Bei der Einbettung des Meßprozesses in das Meßprogramm, das fast alle diese Datentransporte ausführt, wurde die Unbestimmtheit nämlich in wesentlichen Teilen absichtlich erhalten. Sie bringt - bei entsprechender Programmierung - gegenüber fixierten Abläufen den Vorteil, daß der Experimentator den konkreten Ablauf jeweils seinen aktuellen Bedürfnissen anpassen kann.

Eine passende Meßprogrammstruktur war schon in /23/ realisiert worden. Sie wurde daher übernommen, der neuen Anlage angepaßt und aufgrund der im Einsatz gewonnenen Erfahrungen verbessert. Das Wesentliche für die angestrebte Flexibilität ist die zentrale Verteilerstruktur (Bild 2.15) des Programms: nach Start und Abarbeitung einer Initialisierungsroutine kann der Benutzer alle vorgesehenen Leistungen in der ihm passenden Reihenfolge aufrufen, indem er das entsprechende Kommando am Terminal eingibt.

Beim Einsatz zeigte sich, daß eine zu große Unabhängigkeit der einzelnen Funktionen einen ermüdend hohen Eingabe- und daher Konzentrationsaufwand vom Benutzer verlangt. Daher wurden bestimmte Standardfolgen im Programmablauf vorgesehen. So werden z.B. nach jeder Leistung, die einen neuen Datensatz erzeugt, automatisch die Leistungen 'Datensatz speichern' und 'Graphische Darstellung' aufgerufen. Damit solche vorgegebenen Sequenzen die Flexibilität nicht wesentlich einschränken, ist der gesamte Dialog mit dem Benutzer so ausgelegt, daß bei jeder Eingabeanforderung zum zentralen Verteiler zurückgeschaltet werden kann.

Die Entlastung des Benutzers von rein technischen Verrichtungen wurde auch innerhalb der Funktionsmodule verfolgt:

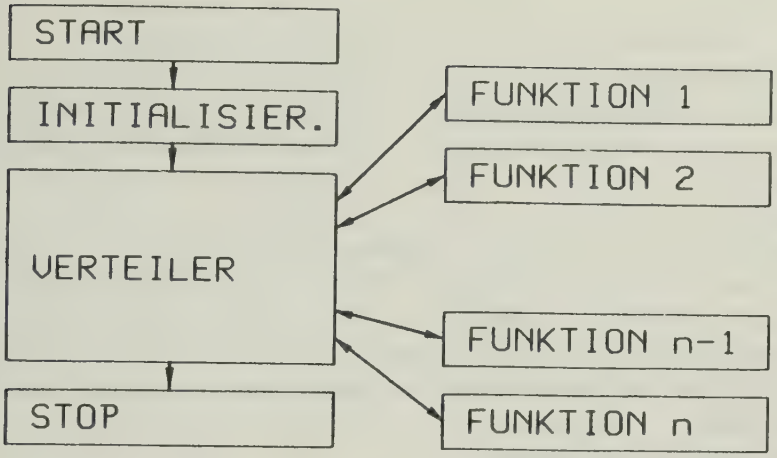


Bild 2.15: Ablaufstruktur des Messprogramms

- jede Eingabeanforderung enthält einen Vorschlag, der durch eine Leereingabe angewählt werden kann,
- längere Abfragesequenzen können blockweise akzeptiert oder abgelehnt werden,
- bei massenspeicherbezogenen Operationen werden die nötigen Filenamen automatisch generiert, der Benutzer muß hier nur in Problemfällen eingreifen,
- Protokolleingaben werden für die Aufnahme der Hardcopy-Bilder vorformatiert abgespeichert, so daß sie ohne weitere Bearbeitung ausgedruckt werden können,
- unabhängig von der Benutzersteuerung werden die wichtigsten Daten zum Stand des Experiments (Parametersatz, aktuelle Meßkurve, die gültigen Graphikparameter) auf der Systemdiskette gesichert, so daß nach jeder Unterbrechung des Programmlaufs der Betrieb mit dem neuesten Parametersatz wieder aufgenommen werden kann.

Das gesamte Meßprogramm ist in FORTRAN geschrieben. Die Module operieren alle auf einer zentralen Datenstruktur, die die Meßparameter, die Meßdaten einer Messung, einen messungsbezogenen Text, und die Steuerparameter für Programmablauf und Graphik enthalten. Sie sind im wesentlichen strukturiert programmiert und somit Änderungen und Erweiterungen leicht zugänglich.

Neben den von vorne herein nötigen Modulen wurden im Laufe der Arbeit noch die Funktionen 'Filter' und 'Plot' realisiert. Mit Filter kann ein vorhandener Datensatz nachträglich digital gefiltert werden (Moving-Average-Filter /17/), mit Plot wird aufgrund der letztbenutzten Graphikparameter ein Datenfile zur graphischen Ausgabe auf dem Tusche-Plotter des Institutsrechners erstellt.

2.4 DIE LEISTUNGSFÄHIGKEIT DER ANLAGE

2.4.1 Tests der Anlage

Test und Optimierung der Anlage erfolgten blockweise dem jeweiligen Stand des Aufbaus entsprechend: zunächst wurde durch einfache betriebssytemunabhängige Maschinenprogramme die Funktion der Kopplungselektronik verifiziert, dann der Treiber und der Rumpf des Prozeßprogramms entwickelt und ohne Vorverstärkungssystem getestet und zuletzt die Leistung des Gesamtsystems mit Vorverstärkung und Abschirmkammer ermittelt.

Für eine Beschreibung der Leistungsfähigkeit der Anlage sind die Ergebnisse der zweiten und der dritten Stufe von Bedeutung: die Ergebnisse der Stufe zwei beschreiben die Leistungsfähigkeit des Mittelungsprozesses und des Differenzmessungsverfahrens, die Ergebnisse des Gesamtsystems die erreichbaren Werte bei Experimenten im abgeschirmten Kryostaten.

2.4.1.1 Die Mittelungsanlage ohne Vorverstärkung

Zunächst wurde die korrekte Aufzeichnung großer, rauscharmer Signale verifiziert, indem das Signal eines Pulsgenerators direkt aufgezeichnet wurde. Als nächstes wurde die Signalmittelung erprobt, indem ein bekanntes Signal (Pulsgenerator) mit einem etwa doppelt so großen Rauschen (SNR ~ 0.5) gemischt und durch Mittelungen rekonstruiert wurde. Die Mischung erfolgte im Rekorder selbst, indem das Signal an den nicht invertierenden, das Rauschen an den invertierenden Eingang des Rekorders angeschlossen wurde.

Dabei wurde die Geschwindigkeit des Mittelungsprozesses als wesentliche Leistungsgrösse des Systems gemessen: die Mittelung dauert ca. 27 µs pro verarbeitetem Datenwort und Meßzyklus. Dies ergibt (bei Vernachlässigung von Warte-und Aufzeichnungszeiten) Aufzeichnungswiederholraten von etwa 20 Hz bei der Verarbeitung von 2000 Datenworten pro Aufzeichnung bis zu 3.8 kHz bei nur 10 verarbeiteten Worten.

Als letztes wurde auf dieser Stufe die Wirksamkeit des Differenzmessungsverfahrens ermittelt. Dazu wurden wieder bekannte Signale aufgezeichnet und - als Extremfall einer Differenzmessung - von sich selbst subtrahiert. Ergebnisse solcher Messungen zeigt Bild 2.16.

Es zeigt sich, daß die Differenzbildung nicht exakt Null ergibt, wobei eine Abhängigkeit des Ergebnisses von der Signalform erkennbar ist. Das schlechteste Ergebnis zeigte der Test mit einem Rechteckpuls als Modellstörung: er wurde um 'nur' 30 dB gedämpft, während bei Pulsformen mit flachen Flanken Dämpfungen von 40 dB und mehr erreicht wurden. Je steiler also eine Signalflanke, desto grösser ist der zu erwartende Rest bei der Differenzbildung.

Dieser Rest ist die Folge des endlichen Triggerjitters des Rekorders (siehe Bild 2.17). Er kann einerseits also nicht eliminiert, andererseits aber, da es ein zufälliger Fehler ist, durch eine Erhöhung der Zyklenzahl vermindert werden. Das muß bei der Aufnahme und Interpretation von Differenzmessungen berücksichtigt werden. So sollten steile Flanken in der zu unterdrückenden Störung (z.B. Pick-up)

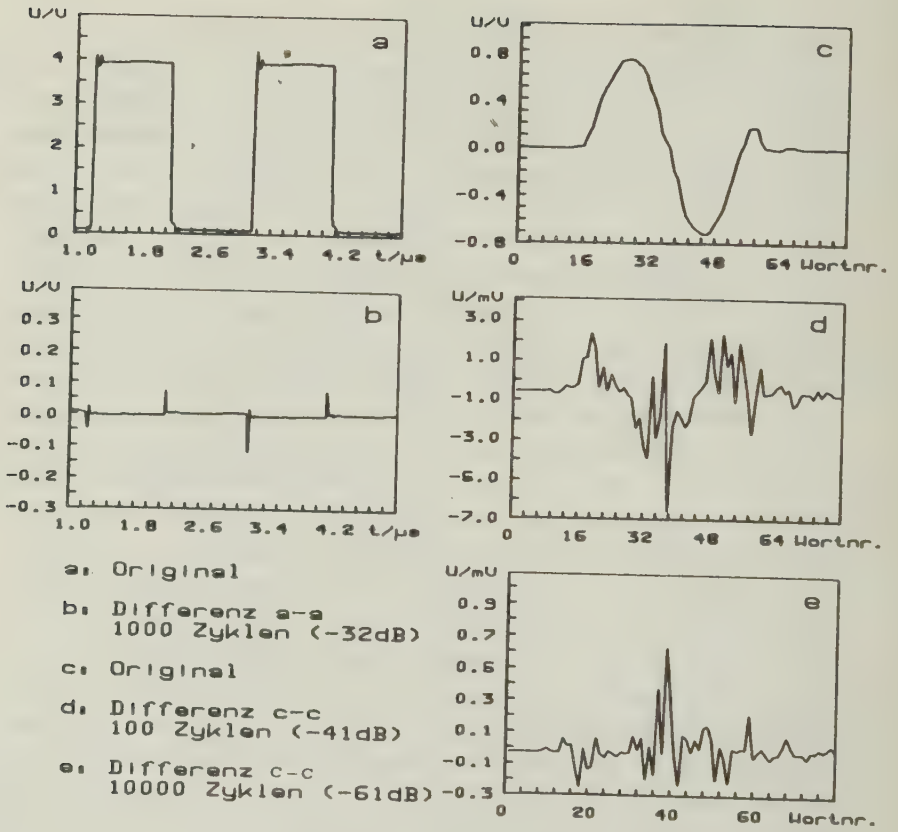


Bild 2.16: Testmessungen zum Differenzmessverfahren
linke Spalte: bei steilen Flanken im Signal
rechte Spalte: bei flacheren Signalflanken

vermieden oder zumindest zeitlich so gelegt werden, daß sie nicht mit dem Nutzsignal zusammenfallen. Wenn das nicht möglich ist, müssen die Ergebnisse mit entsprechender Vorsicht interpretiert und z.B. durch Kontrollmessungen abgesichert werden.

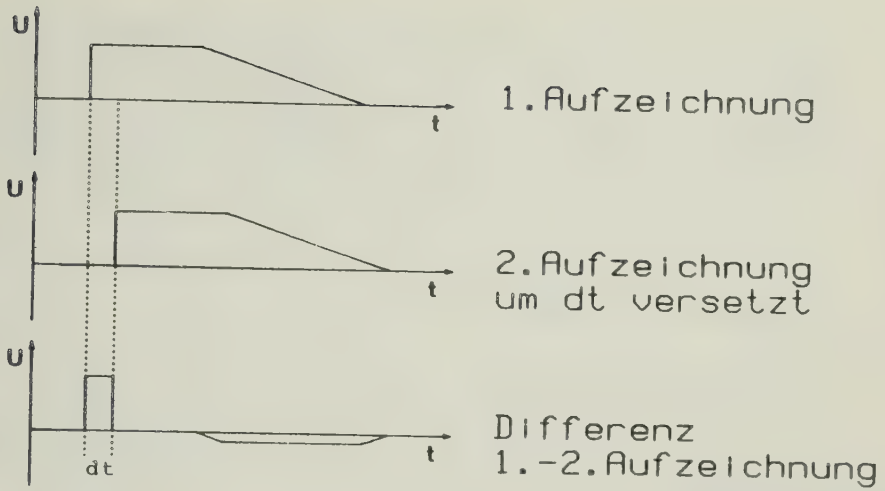


Bild 2.17: Erklärung des Störungsrestes bei Differenzmessungen durch Triggerschwankungen

2.4.1.2 Die Mittelungsanlage mit Vorverstärkersystem

Bei diesen Tests wurde versucht, den Bedingungen des geplanten Experiments möglichst nahe zu kommen. Das gelang in Bezug auf die Erdschleifen (nur lokal) und Plazierung der Verstärker (Vorverstärker in der Abschirmkammer), während eine Differenzmessung, wie sie beim Supraleitungsexperiment eingesetzt werden sollte, bei Zimmertemperatur nicht realisiert werden konnte. Statt dessen wurde die Differenz zwischen zwei verschieden stark abgeschwächten Testsignalen (beide # 0) gemessen. So wurden die letzten Tests erst während der ersten Tieftemperaturexperimente durchgeführt (siehe Kapitel 4).

Die Tests bei Zimmertemperatur bestanden wieder in der Rekonstruktion bekannter Signale. Allerdings wurden die Testsignale nun zunächst bis in den Nanovolt-Bereich abgeschwächt und anschliessend über das Verstärkersystem dem Rekorder zugeführt. Dabei wird das wesentlich grössere Verstärkerrauschen zugemischt, so daß das Signal in der Einzelaufzeichnung nicht mehr zu erkennen ist. Durch den

Vergleich der Rekonstruktionsergebnisse mit den Originalsignalen konnte die korrekte Funktion der Anlage verifiziert werden (siehe Bild 2.18). Die Testmessungen wurden auch, wie beim Experiment notwendig, mit verschiedenen Zeitauflösungen durchgeführt, es kamen also auch die bandlimitierenden Filter zum Einsatz.

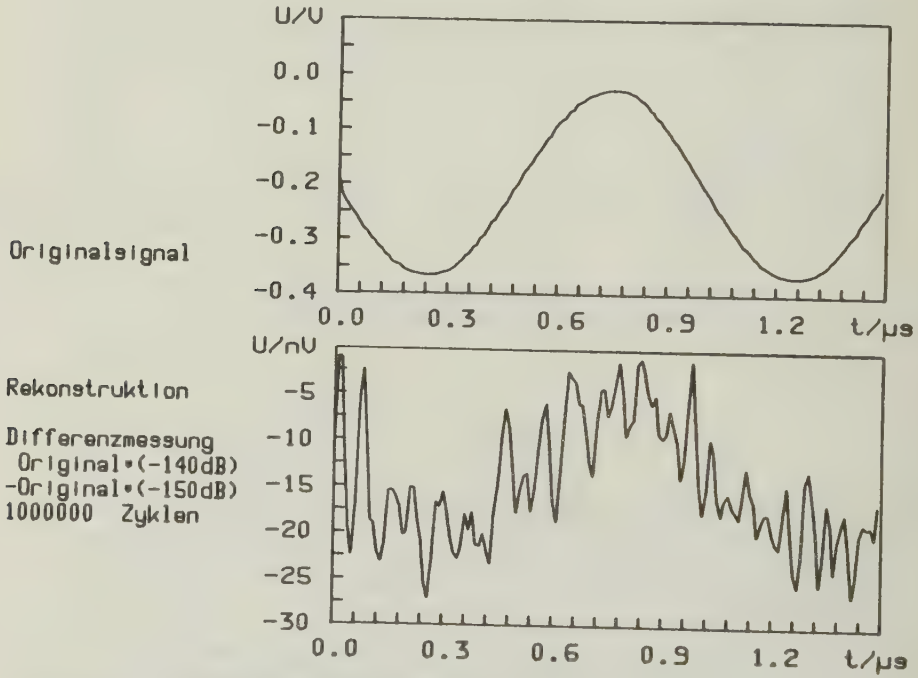


Bild 2.18: Hochauflösende Testmessung mit einer Spannungsauflösung von etwa 2 nV

Die Ergebnisse lassen sich so beschreiben: das Gesamtsystem zeigt, abhängig von der speziellen Verdrahtung, ein Eingangsrauschen von 5-40 µV bei 25 MHz oberer Grenzfrequenz. Der Mittelungsprozeß verbessert das Signal-Rausch-Verhältnis wie erwartet ($\sim\sqrt{\text{Zyklenzahl}}$). Die Gesamtmeßzeit ist von der angestrebten Spannungauflösung, der Zeitauflösung, dem aufgezeichneten Zeitintervall und dem Meßverfahren abhängig.

Die Meßzeit steigt linear mit der Zyklenzahl (also quadratisch mit der Verbesserung der Spannungsauflösung) und der Anzahl der verarbeiteten Punkte, d. h. dem Verhältnis Meßintervall/Abtastintervall.

Da eine Erhöhung der Zeitauflösung immer eine Erhöhung der Bandbreite, also auch des Rauschens, und -zur Aufzeichnung des gleichen Zeitintervalls- eine Erhöhung der Punktzahl erfordert, steigt die Gesamtmeßzeit quadratisch mit der Verbesserung der Zeitauflösung.

Das Meßverfahren (Differenz- bzw. Einfachmessung) bewirkt eine Verdopplung der Meßzeit bei Differenzmessungen gegenüber der Einfachmessung.

Die beim Supraleitungsexperiment angestrebte Messung von ca. 100 nV-Signalen mit einer Auflösung im zehn-nV-Bereich wird, je nach Zeitauflösung und Meßintervalldauer, in wenigen Minuten bis einer halben Stunde erreicht. Damit war das Ziel des Aufbaus erreicht. Daher wurde auch nicht weiter nach den endgültigen Grenzen der Apparatur gesucht, zumal diese ja stark vom jeweiligen Einsatz abhängen (Pick-up, Erdschleifen). Bei einigen Tests zeigte sich aber, daß Auflösungen in der Größenordnung Nanovolt erreichbar sind, wenn die Meßzeit stark vergrößert werden kann (Bild 2.18).

Dabei ist die Technik der Differenzmessung wesentlich: sie eliminiert nicht nur ein relativ großes Pick-up, sondern auch sehr kleine, aber bei hoher Auflösung stark störende systematische Fehler wie z.B. DC-Offsets, bevorzugte Bitmuster und Übersprechen innerer Schaltprozesse der Apparatur auf den Signalweg /17,24/.

2.4.2 Aktueller Stand und Ausblick

2.4.2.1 Der aktuelle Stand

Es wurde eine Meßapparatur aufgebaut, die mit rechnergestützter Signalmittelung die Messung repetierlich

erzeugter Spannungen bis in den Bereich einiger zehn Nanovolt bei einer Bandbreite bis zu 25 MHz (entsprechend einer Zeitauflösung von 10 ns) ermöglicht. Diese absoluten Zahlen sagen zunächst wenig. Sie müssen mit den Möglichkeiten anderer Appartüren und Verfahren verglichen werden.

Wie schon weiter oben erwähnt, erreicht die Anlage nicht die Zeitauflösung schneller Boxcars und schon garnicht die der Josephson-Sampler /25/. Beim Vergleich der Spannungauflösungen allerdings liegt sie deutlich über den genannten Geräten. Verwendet man für diesen Vergleich das oft bei Meßanlagen angegebene Produkt Zeitauflösung x Spannungsauflösung, so zeigt sich, daß die Mittelungsanlage durchaus die gleiche Grössenordung (10^{-16} - 10^{-17} Vs) wie der Josephson-Sampler erreicht. Das heißt aber keineswegs, daß die Mittelungsanlage eine Konkurrenz zu diesen Apparaturen darstellt. Die Arbeitsbereiche der verschiedenen Anlagen, die aus den Produkten nicht mehr zu entnehmen sind, unterscheiden sich aufgrund der benutzten Technologie (dem zugrundliegenden physikalischen Effekt) so drastisch, daß sie praktisch nur als sich gegenseitig ergänzende, nicht aber miteinander konkurrierende Wege zu hochauflösenden Messungen verstanden werden können.

Dieser hier nur kurz angedeutete Vergleich ist ausführlich in /26/ behandelt; dort wird auch die Frage aufgegriffen ob die Angabe von Flußmengen, die kleiner als ein Flußquant ($2*10^{-15}$ Vs) sind, überhaupt physikalisch sinnvoll ist.

Zum aktuellen Stand der Anlage bleibt zu ergänzen:

- der Rekorder ist ein Zwei-Kanalgerät und auch die Kopplung und ihre Programmierung erlauben die Anwendung des Zweikanalbetriebs. Lediglich die Meßroutine und das Graphikmodul bedürfen einer spezifischen Modifikation (Umrechnen mit zwei verschiedenen Eingangsempfindlichkeiten, Kanalanwahl und ggf. zwei Maßstäbe) , um ihn genauso effektiv wie den Einkanalbetrieb zu nutzen. Dies wurde nicht realisiert, da bisher kein entsprechender Bedarf bestand (*).

- für Messungen mit wesentlich geringerer Zeitauflösung (>= 500 µs Abtastintervall, hier könnte eine extrem hohe Spannungsauflösung interessant sein) muß die Synchronisation zwischen Rekorder und Rechner neu programmiert werden: der Rekorder arbeitet dann in einem anderen Aufzeichnungsmode, der das realisierte Synchronisationsverfahren unbenutzbar macht. Bei solch großen Zeiten ist allerdings zu überlegen, ob die direkte Synchronisation noch sinnvoll ist und nicht besser durch einen anderen Mechanismus ersetzt werden sollte, der z.B. eine anderweitige Nutzung des Rechners während der Einzelaufzeichnung im Rekorder ermöglicht.

Die Anwendung der Meßanlage ist, obwohl sie für ein spezielles Experiment entwickelt wurde, nicht auf diese eine Anwendung beschränkt. Schon während der Endphase der Entwicklung und auch nach der Fertigstellung konnte die Mittelungsanlage erfolgreich bei anderen Experimenten eingesetzt werden /29/. Hier bewährte sich das Konzept einer auf Allgemeinverwendbarkeit ausgerichteten Entwicklung.

Bei solchen Einsätzen gibt es, dem blockweisen Aufbau der Anlage entsprechend, zwei grundsätzlich verschiedene Verfahrensweisen. Zunächst können die Experimente im gleichen Kryostaten vorgenommen werden. Dies hat den Vorteil der Nutzung der Abschirmkammer, erfordert aber die Anpassung der Probenhalterung und der sonstigen Geräte an die hier vorliegenden Gegebenheiten. Wenn das nicht möglich ist (z.B. bei optischen Experimenten), so kann die Mittelunganlage unter Verzicht auf die Vorteile der Abschirmkammer zum anderen Experiment transportiert werden. Sie ist in ein fahrbares

(*) Im Zweikanalbetrieb wird auch keineswegs die hohe Zeitauflösung von 100 MHz Abtastrate erreicht: hier ist die Abtastrate auf <=10 MHz begrenzt und muß dann noch halbiert werden, da der Rekorder mit einem Multiplex-Zweikanalverfahren arbeitet.

Rack eingebaut und das Terminal ist zusammen mit dem Thermodrucker auf einem fahrbaren Tisch aufgestellt. Im einfachsten Fall müssen nach Inbetriebnahme der Anlage am neuen Ort zum Messen nur noch Signal- und Triggerleitung an den Rekorder angeschlossen werden. In diesen Fällen ist allerdings oft nicht die maximal mögliche Auflösung zu erreichen, da das Verstärkersystem nur in Verbindung mit einer Abschirmkammer mit voller Bandbreite und voller Verstärkung betrieben werden kann (z.B. /30/).

2.4.2.2 Ausblick

Bei der Darstellung der Entwicklung und des Aufbaus der Apparatur wurde mehrfach auf das Konzept der Allgemeinverwendbarkeit hingewiesen. Schon im vorangehenden Abschnitt konnte der Erfolg dieses Konzepts durch die Anwendung der Anlage bei anderen Arbeiten belegt werden und es wurden auch schon auf einige Erweiterungsmöglichkeiten der Anlage hingewiesen. Dabei wurde nicht diskutiert, welche Spannungen gemessen werden sollen.

Für einen Ausblick auf zukünftige Anwendungen ist aber gerade dieser Aspekt besonders interessant. Selbstverständlich kann die Anlage zu jeder Spannungsmessung im passenden Zeitbereich angewandt werden. Dabei muß noch nicht einmal gemittelt werden: die Anlage erlaubt auch Einzelmessungen, so daß z.B. bei gutem Signal-Rausch-Verhältnis das Verfahren der Differenzmessung angewandt werden kann. Aber man sollte sich gedanklich davon lösen, daß die gemessene Spannung das direkte, gesuchte Resultat des Experiments ist. Es gibt eine Vielzahl von Meßwertwandlern, die irgendwelche anderen Grössen in eine entsprechende Spannung umsetzen. Auch diese Spannungen können beim Einsatz der Meßanlage mit extremer Auflösung gemessen werden. Bei passender Charakteristik des Meßwertwandlers bedeutet das, daß der betreffende Parameter mit entsprechend hoher Auflösung gemessen werden kann.

Das kann am Beispiel eines Amplitudenspektrums verdeutlicht werden. Durch den Anschluß des Ausgangs eines Spektrumanalysators an die Meßanlage konnte in einem Test noch die Spektrallinie eines Testsignals detektiert werden, die 10 dB unter dem Rauschen des angezeigten Spektrums lag. Und auch hier ist die Anwendung der Differenzmessung durchaus sinnvoll: eingestreute störende Spektrallinien können gedämpft oder die Änderung eines Spektrums bei gezielter Parametervariation mit hoher Auflösung beobachtet werden.

Solche Anwendungen können mit den oben genannten Einschränkungen ohne Umprogrammierung der Anlage durchgeführt werden. Eine Weiterentwicklung in eine andere Richtung ist möglich, wenn man eine Veränderung des Meßprogramms mit einschliesst. So könnte man z.B. einen Box-Car-Integrator mit der Meßanlage kombinieren: der Box-Car arbeitete dann als reiner Zeitumsetzer (Stroboskop), während die Mittelungsanlage für die Erhöhung der Spannungsauflösung (inklusive Differenzmessung) eingesetzt würde. So liessen sich die Vorteile beider Systeme (hohe Zeitauflösung einerseits und hohe Spannungsauflösung, Langzeitstabilität und präzise Differenzmessung andererseits) kombinieren. Bei Tests dieser Idee zeigte sich ihre Realisierbarkeit, aber auch die Notwendigkeit einer Neuprogrammierung des Meßprozesses. Das liegt daran, daß der zur Verfügung stehende Box-Car bei Verwendung eines Tastkopfes mit deutlich höherer Zeitauflösung als der Transientenrekorder (nur dann lohnt sich die Kombination der Geräte) einen so hohen Zeitumsetzungsfaktor hat, dass der angepasste Betrieb des Rekorders die Einstellung eines sehr großen Abtastintervalls erfordert. Darauf ist der Meßprozeß -wie beschrieben- nicht abgestimmt. Eine genaue Diskussion dieser Möglichkeit ist in /26/ enthalten, eine Realisierung mit anderen Geräten wird in /31/ beschrieben.

KAPITEL 3

DIE ZEITABHÄNGIGKEIT DER FLUSS-WANDERUNGS-SPANNUNG

3.1 DIE MESSTECHNIK

3.1.1 Der Aufbau des Experiments

Bild 3.1 zeigt schematisch den Gesamtaufbau des Experiments. Die einzelnen Elemente werden im folgenden erläutert.

Die Proben waren Zweischicht-Proben aus Indium mit Einschnürung und asymmetrischen Rändern. Die Präparation solcher Proben wird in /13,18/ ausführlich beschrieben. Ihre wesentlichen Eigenschaften bezüglich der Flußwanderungsexperimente sind

- lokalisierter Flußkanal durch die Einschnürung
- einseitige Flußschlauchnukleation durch die Asymmetrie der Probenränder
- vorgegebener Flußkanalverlauf durch eine präparationsbedingte Dickenmodulation.

Die typischen Werte der verwendeten Proben (Anhang A.6) sind 2-6 µm Probenlänge, 10-200 µm Breite und 2 µm Dicke. Die kritische Temperatur lag bei T=3.41 K, das Rest-Widerstands-

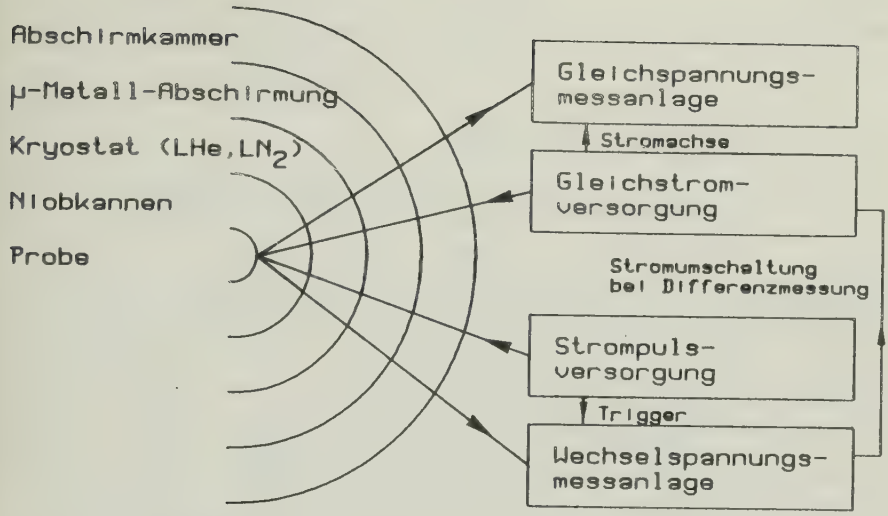


Bild 3.1: Experimentelle Anordnung zur
Messung der Flußwanderungsspannung

Verhältnis betrug ca. 140.

Die Proben standen während der Experimente in direktem Kontakt mit flüssigem Helium in einem Standard-Glaskryostaten. Die Temperatur des Heliumbades wurde über eine Druckregelung eingestellt und konstant gehalten. Die Messungen wurden bei Temperaturen von 2-3.3 K (T/Tc= 0.6-0.99) durchgeführt.

Die magnetische Abschirmung war bei den meisten Experimenten zweistufig. Der Kryostat war von einer dreifachen Mü-Metall-Abschirmung und die Probe selbst noch von zwei Niobkannen /18/ im Heliumbad umgeben.

Die Abschirmkammer, sowie die Funktionsblöcke Probenversorgung und Wechselspannungsmessung sind in Kapitel 2 beschrieben.

Die Gleichspannungsmeßanlage bestand aus einem batteriebetriebenen Keithly 140 Nanovolt-Verstärker mit nachgeschaltetem Trennverstärker und einem X-Y-Schreiber. Normalerweise wurde hiermit eine Auflösung von einigen Nanovolt erreicht. Diese Anlage wurde nach Abschluß der Gleichspannungsmessungen jeweils vom experimentellen Aufbau

getrennt, da allein ihr Anschluß eine starke Zunahme des Rauschens in der Wechselspannungsanlage bewirkte.

3.1.2 Der Ablauf der Experimente

3.1.2.1 Die Ansteuerung bei den zeitaufgelösten Messungen

Messungen mit Hilfe der Signalmittelung erfordern eine repetierliche Signalerzeugung. Die naheliegendste Lösung dafür ist die Anwendung eines Gleichstroms, dem ein Rechteckstrompuls überlagert wird (Bild 3.2, /16,18/). Dies entspricht zum einen dem theoretischen Ansatz in /10,14/, wo von einem flußfreien Supraleiter ausgegangen wird, der übergangslos einem überkritischen Strom ausgesetzt ist. Zum anderen ist bei steilen Pulsflanken eine maximale Triggergenauigkeit zu erwarten.

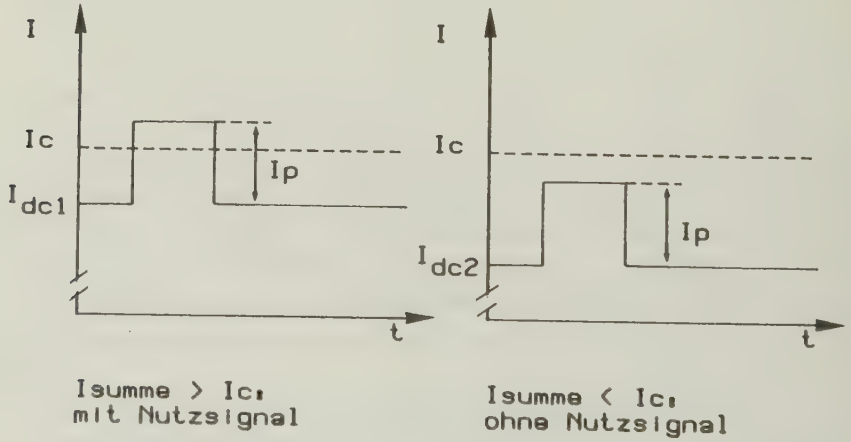


Bild 3.2: Ansteuerung der Probe für Differenzmessungen

Diese Ansteuerung erzeugt aber -trotz optimierter Kabelführung /16,18/- kohärente Störungen (Pick-up), die das erwartete Signal um mehrere Größenordnungen überschreiten und für eine Beobachtung gleichzeitiger Abläufe in der Probe unbedingt

unterdrückt werden muß (z.B.: ein Strompuls von Ip=10mA, Anstiegszeit ~10ns ergibt Pick-up-Spitzen von ca. 400µV).

Das in dieser Arbeit angewandte Verfahren zur Unterdrückung kohärenter Störungen beruht darauf, daß der Übergang vom supraleitenden zum Flußwanderungszustand unstetig erfolgt und daß das Übersprechen des Anregungspulses auf die Signalleitung im wesentlichen von der Geometrie der Probe und der Kabelführung abhängt, nicht aber vom Leitungszustand der Probe. So kann nämlich das Störsignal absolut nutzsignalfrei aufgezeichnet werden: durch ein Absenken des Gleichstroms auf einen Wert Idc2 (Bild 3.2), bei dem die Stromsumme I=Idc+Ip den kritischen Strom nicht überschreitet, stellt sich zu keinem Zeitpunkt des Meßzyklus der Flußwanderungszustand ein. Die dann gemessene Spannung ist die reine Störspannung.

Die so aufgezeichnete nutzsignalfreie Störung kann dann von einer Messung subtrahiert werden, bei der in jedem Meßzyklus der Flußwanderungszustand erreicht wird (Ip+Idc>Ic), die also neben dem Störsignal auch das gesuchte Nutzsignal enthält. Im Endergebnis tritt dann das Störsignal nicht mehr auf, es zeigt die reine Nutzspannung.

Das Wesentliche bei diesem Ablauf ist, daß beim Umschalten von nutzsignalfreien zu nutzsignalhaltigen Messungen und zurück nur der Gleichstrom verändert wird, während die Einstellung des Strompulses absolut unverändert bleibt, und daß die Umschaltung des Gleichstroms ohne jede Änderung in der Kabelführung erfolgt. Nur so kann man ein von Messung zu Messung unverändertes Störsignal, das im Endergebnis verschwindet, erwarten.

Das Verfahren arbeitet zwar sehr gut (siehe Kapitel 2,/32/), aber keineswegs ideal. So kann, bedingt durch kleine Schwankungen des Triggerzeitpunktes, bei der Differenzbildung ein Störungsrest erhalten bleiben (Bild 2.17 Kapitel 2).

Ein solcher Rest ist in seiner Höhe im wesentlichen proportional zur Ableitung des Störsignals, das selbst wieder proportional zur Ableitung des Strompulses ist. Bei Rechteckpulsen ist er also besonders groß (beim obigen Beispiel noch 2-4µV >> Flußwanderungsspannung) und fällt zudem zeitlich mit entscheidenden Teilen des Nutzsignals zusammen,

so daß er besonders störend wirkt.

Da keine Aussicht bestand, das Übersprechen des Strompulses auf die Signalleitung wesentlich zu reduzieren, mußte ein Verfahren zur repetierlichen Ansteuerung der Probe gefunden werden, das

- möglichst kleine Störsignale und Störsignalreste erwarten läßt,
- die Maxima des Störsignalrestes zeitlich von der zu messenden Spannung trennt
- und trotzdem eine ausreichende Triggergenauigkeit aufweist.

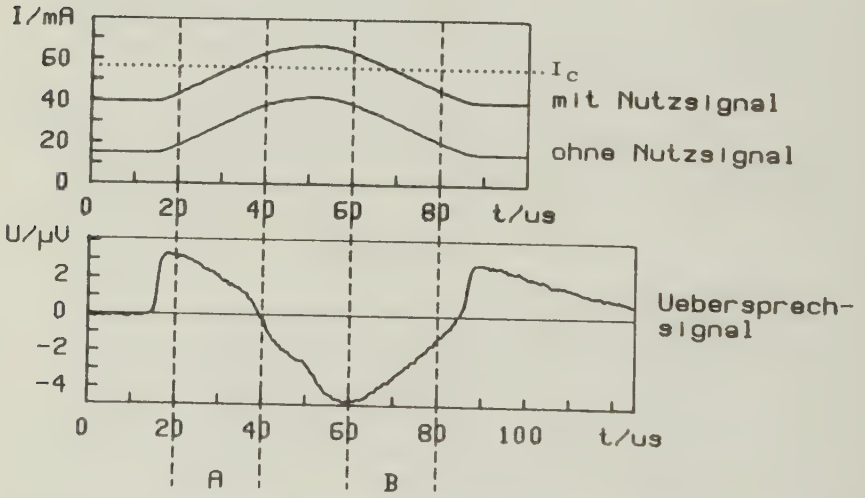


Bild 3.3: Ansteuerung der Probe mit Dreieckstrompulsen und dadurch erzeugtes Übersprechsignal
(Probe In-4 bei T = 3.00 K; Ic ~ 55 mA)

Die Lösung zeigt Bild 3.3. Sie besteht in der Anwendung eines dreieckigen Strompulses mit möglichst abgerundeten Ecken und einer Steigung von etwa 1mA/µs anstelle des Rechteckpulses.

In Übereinstimmung mit den oben aufgeführten Relationen ist das von ihm erzeugte Störsignal wesentlich kleiner als das der bislang angewandten Rechteckpulse und es zeigt nur bei den Knickpunkten des Stromverlaufs steile Flanken. Es sind also

relativ kleine Störsignalreste zu erwarten.

Die geforderte zeitliche Trennung von Pick-up-Resten und wesentlichen Ereignissen an der Probe wird offensichtlich erfüllt: sowohl der Einsatz (Bild 3.3: A) als auch das Ende (Bild 3.3: B) des Flußwanderungsprozesses fallen in Zeiten, zu denen kein großer Störungsrest zu erwarten ist. Lediglich in der Mitte des Strompulses besteht die Gefahr einer Störung des Nutzsignals durch einen Pick-up-Rest. In der Praxis gelang es allerdings oft, auch an diesen Stellen die Störung vollständig zu unterdrücken. Dazu wurde die Dreieckspitze abgerundet und die Meßzyklenzahl möglichst hoch gewählt.

Die Tiggerstabilität wurde nicht besonders untersucht. Sie erwies sich in der Anwendung als ausreichend, wenn die Pulsflanken eine Steigung von etwa 1 mA/µs hatten, während mit wesentlich flacheren Flanken keine guten Messungen gelangen. Wesentlich steilere Pulsfanken wiederum waren praktisch nicht einsetzbar, da das Störsignal mit deren Steigung wächst und sie den ausmeßbaren Zeitraum stark reduzieren.

3.1.2.2 Der Gesamtablauf

Legt man die oben beschriebene Ansteuerung der Probe zugrunde, so kann der Meßprozeß als zeitaufgelöste Aufzeichnung eines Teils der Strom-Spannungskennlinie aufgefaßt werden: während der ersten Pulshälfte (A in Bild 3.3) wird der Strom zeitproportional hochgefahren, während der zweiten (B in Bild 3.3) wieder abgesenkt. So wird pro Zyklus gerade der interessierende Teil der Strom-Spannungs-Kennlinie, der Bereich um I=Ic, durchlaufen.

Aus praktischen Gründen wurden die zeitaufgelösten Messungen nicht direkt angegangen, sondern meist folgender Ablauf ausgeführt:

- Helium abfüllen, Restwiderstandverhältnis der Probe ermitteln (Reinheitsprüfung)

- weiter abkühlen und Tc bestimmen (Typ I-Überprüfung)
- Temperaturstabilisierung ca. 15-30 Minuten
- Aufzeichnung der Strom-Spannungs-Kennlinie mit der Gleichspannungsanlage (Bestimmung der Parameter Idc1, Idc2, und Ip)
- Aufzeichnung der Strom-Spannungs-Kennlinie mit der Wechselspannungsanlage aber geringer Zeitauflösung (Suche eines stabilen Arbeitspunktes Idc1/Idc2)
- zeitaufgelöste Messung der gleichen Kurve mit sonst unveränderten Parametern
- eventuell weitere Messungen mit Parametervariationen.

3.2 DIE ERGEBNISSE

3.2.1 Die Zeitspannungskurve

Bild 3.4 faßt die Ergebnisse eines solchen Experiments zusammen. Teilbild a zeigt die Gleichspannungs-Strom-Spannungs-Kennlinie, Teilbild b den Verlauf des daraufhin ausgewählten Strompulses. In Teilbild c erscheint der entscheidende Teil der Strom-Spannungs-Kennlinie wieder, diesmal mit der Wechselspannungsmeßanlage (Bandbreite 6kHz-0.8MHz) aufgezeichnet, und Teilbild d schießlich zeigt den zeitlichen Ablauf des Einsatzes der Flußwanderungsspannung (Bandbreite 6kHz-12MHz).

In offensichtlicher Übereinstimmung mit den Erwartungen befindet sich das Auftreten der Spannungspulse und der allgemeine Verlauf der Messkurve. Eine detaillierte Interpretation des Ergebnisses, insbesondere des ersten Spannungssprungs, der deutlich vor dem Einsetzen der Spannungspulse auftritt, erfordert eine genauere Betrachtung des Ablaufs, wie sie im folgenden gegeben wird. Bei dieser Betrachtung wird -mit Rücksicht auf die realen Verhältnisse- immer von einer Probe mit asymmetrischen Rändern ausgegangen. Es wird also der unsymmetrische Fall der Flußwanderung diskutiert, bei dem nur an einer Probenseite eine Flußschlauchnukleation

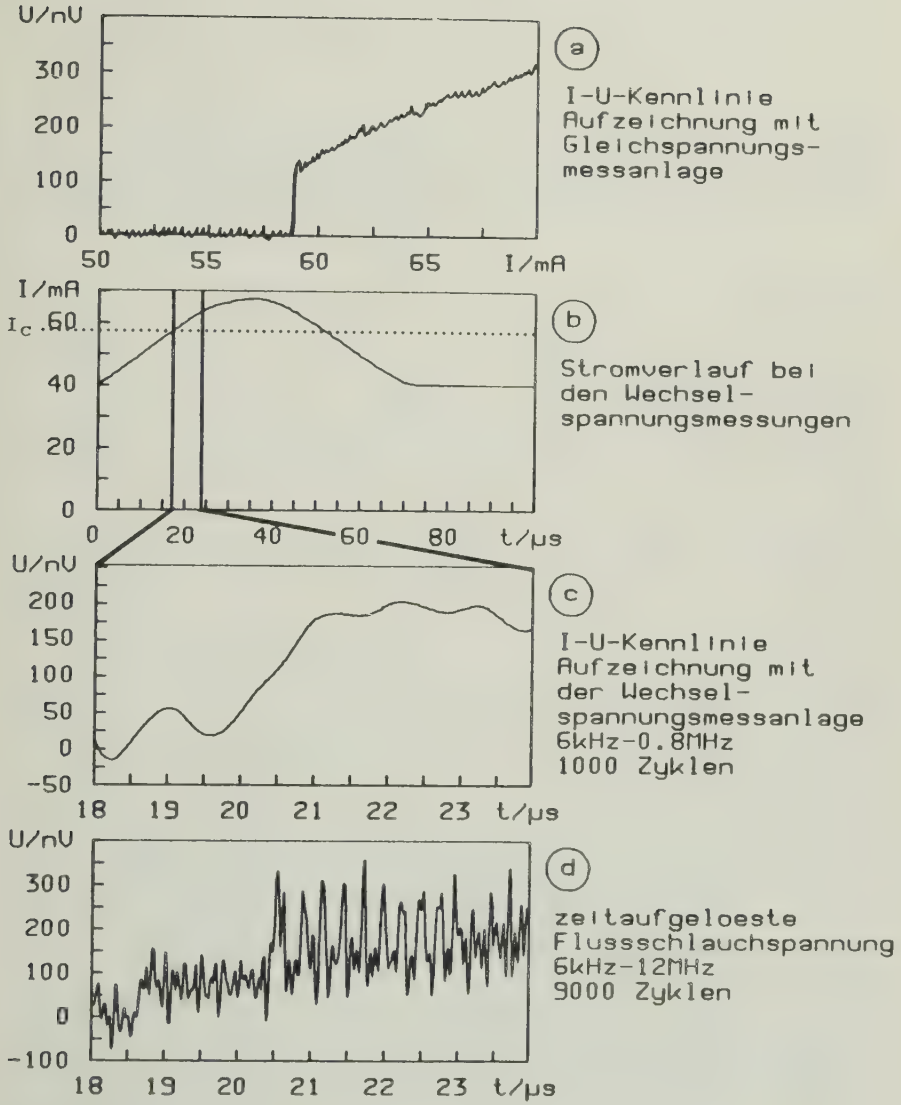


Bild 3.4: Von der Gleichspannungs-I-U-Kennlinie zur zur zeitaufgelösten Flußwanderungsspannung (Probe In-4 bei T = 3.00 K; Ic ~ 60 mA)

stattfindet und die Flußschlauchvernichtung an der entgegengesetzten Seite erfolgt.

3.2.1.1 Die erwartete Signalform

Zum Zeitpunkt der Nukleation des ersten Flußschlauches -das Probeninnere wird zunächst als flußfrei angenommen- wirken drei Kräfte auf die betroffene Flußstruktur (Bild 3.5):

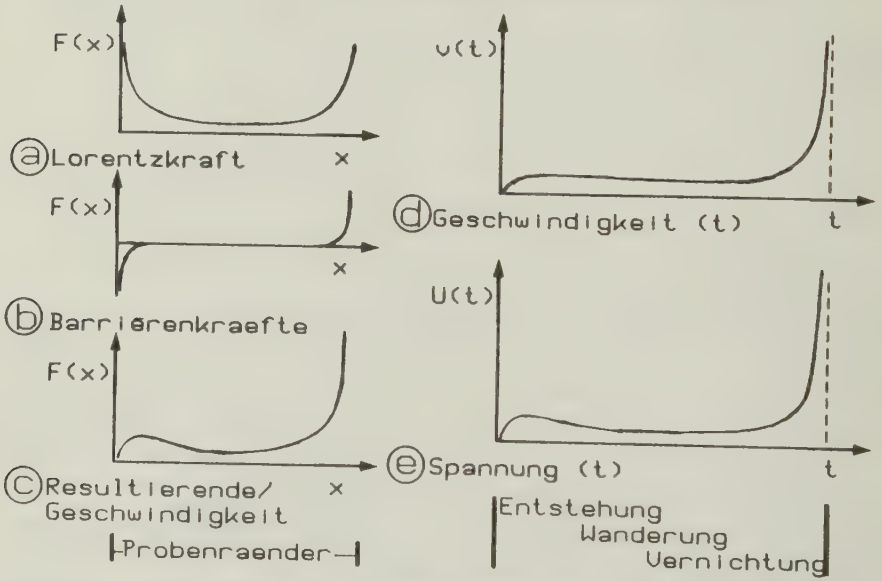


Bild 3.5: Ortsabhängigkeit der Kräfte auf einen Flußschlauch und die daraus gefolgerte zeitabhängige Geschwindigkeit und Flußwanderungsspannung (qualitativ). Es wird der unsymmetrische Fall betrachtet: Die Nukleation der Flußschläuche erfolgt am linken Rand, die Vernichtung am rechten Rand.

- als einzige antreibende Kraft wirkt die Lorentzkraft (Teilbild a). Ihre Ortsabhängigkeit folgt direkt der Stromdichte des Transportstromes. Diese zeigt wegen des großen Entmagnetisierungsfaktors der Probe eine starke Überhöhung an den Rändern /33/, wirkt aber überall in die gleiche Richtung: von der Nukleationsseite zur Vernichtungsseite der Probe.

- die Barrierenkräfte (Teilbild b). Sie resultieren aus den zur Nukleation nötigen Energiebeiträgen, versuchen also die Entstehung des Flußschlauches zu verhindern. Sie sind daher extrem auf den Rand konzentriert und immer nach aussen gerichtet.
- die geschwindigkeitsabhängige Dämpfungskraft. Sie begrenzt die auftretende Geschwindigkeit des Flußschlauches, wenn die anderen Kräfte sich nicht die Waage halten und der Flußschlauch bewegt wird.

Eine Flußschlauchnukleation tritt genau dann ein, wenn die Summe aus Lorentzkraft und Barrierenkräften positiv wird, also die Kraft in Richtung Probeninneres überwiegt (Teilbild c).

Bei der Ansteuerung der Probe mit Dreieck-Strompulsen steigt der Strom und damit die antreibende Lorentzkraft relativ langsam (Gesamtanstiegszeit 10-50µs) im Vergleich mit der Nukleationszeit von einigen Mikrosekunden, so daß die Nukleation bei praktisch konstanter Antriebskraft F(I)=F(Ic) stattfindet. Diese Kraft ist nur wenig größer 0, sodaß der Flußschlauch sehr langsam in die Probe eindringt.

Diese Überlegung kann auf den gesamten Weg des Flußschlauches ausgedehnt werden (Lebensdauer: einige Mikrosekunden < Pulsanstiegszeit). Es ergibt sich qualitativ folgender ortsabhängiger Kraftverlauf: die resultierende Kraft ist bei der Nukleation nur wenig größer als Null, da die Antriebskraft die Barrierenkräfte nur knapp überwiegt. Im Innern der Probe ist sie nicht wesentlich größer, da dort nur ein kleiner Teil des Transportstromes fließt. Lediglich am Vernichtungsort, dem hier rechts dargestellten Probenrand, tritt ein schmales, hohes Kraftmaximum auf. Dort nämlich wirken Barrierenkräfte und Lorentzkraft in die gleiche Richtung.

Um eine Vorstellung von der zugehörigen Signalspannung zu gewinnen, muß von der Ortsabhängigkeit zur Zeitabhängigkeit übergegangen werden.

Der erste Schritt ist der Schluß von der ortsabhängigen Kraft auf die ortsabhängige Geschwindigkeit. Diese folgt direkt der Ortsabhängigkeit der resultierenden Kraft, da der Flußschlauch eine stark gedämpfte Bewegung ausführt, bei der

praktisch keine kinetischen Energien auftreten /4/.

Die so gewonnene Orts-Geschwindigkeitskurve (Teilbild c) kann qualitativ folgendermaßen in eine Zeit-Geschwindigkeitskurve übersetzt werden (Teilbild d). Zunächst durchläuft der Flußschlauch eine lange Strecke mit kleiner Geschwindigkeit, dafür braucht er also eine lange Zeit. Den kleinen Rest der Strecke in der Nähe des Vernichtungsrandes hingegen durchläuft er mit einer hohen Geschwindigkeit, also in sehr kurzer Zeit.

Das so gewonnene Geschwindigkeitsprofil der Flußschlauchbewegung muß noch mit dem Geometriefaktor (siehe Einleitung) modifiziert werden, damit eine Zeit-Spannungs-Kurve (Teilbild e) entsteht. Er betont die Spannung, wenn sich der Flußschlauch in der Nähe der Probenränder befindet. Der Aufenthalt des Flußschlauches in Probenrandnähe entspricht dem Anfang und dem Ende seiner Existenzzeit, so daß sich der Geometriefaktor praktisch nur auf Anfang und Ende des Spannungsprofils auswirkt.

Das so gewonnene Profil kann natürlich nur eine grobe Näherung sein, gibt aber das Wesentliche des mathematischen Modells wieder. Das zeigt sich darin, daß es den Charakter der numerisch gewonnenen Profile /11,12/ gut wiedergibt.

Damit ist eine Vorstellung von der erwarteten Signalspannung für den Fall gewonnen, daß sich jeweils nur ein Flußschlauch im Flußkanal befindet. Dies ist aber, wie magnetooptische Beobachtungen /4,6/ zeigen, keineswegs der Normalfall. Die Überlegungen müssen also noch auf den Fall, daß sich mehrere Flußschläuche gleichzeitig in der Probe befinden, erweitert werden.

Sobald der Flußkanal zwei oder mehr Flußschläuche zur gleichen Zeit enthält, ergibt sich die Gesamtspannung über den Flußkanal durch eine Kombination der Spannungen der einzelnen Flußschläuche. Dabei gilt, dass sich die Gesamtspannung durch Superposition der Einzelspannungen ergibt /15/, das Gesamtspannungsprofil U(t) also durch Addition der Einzelspannungen Ui(t) gewonnen wird.

Damit ist auch schon das einfachste Modell zur Beschreibung dieses Falls erstellt: die oben gewonnenen Spannungsprofile der einzelnen Flußschläuche werden zur Gesamtspannung aufsummiert.

Ein so einfaches Modell vernachläßigt aber die Wechselwirkung der Flußschläuche untereinander. Da diese nicht unerheblich für den zeitlichen Verlauf der erwarteten Gesamtspannung ist, werden im folgenden ihre stärksten Auswirkungen kurz diskutiert. Dazu wird von dem bisher erarbeiteten Spannungsprofil eines einzelnen Flußschlauches ausgegangen und überlegt, wie es durch die Wechselwirkungskraft verändert wird. Anschließend werden diese veränderten Profile zu einem Gesamtspannungsprofil kombiniert.

Die Wechselwirkungskraft ist - im Gegensatz zu den bisher besprochenen Kräften - nicht von der Position des betrachteten Flußschlauches im Flußkanal abhängig, sondern nur von seinem momentanen Abstand zu den anderen Flußschläuchen. Sie wirkt zwischen gleichsinnig orientierten Flußschläuchen - wie im hier besprochenen Fall - repulsiv (siehe Einleitung). Damit hängt ihre Auswirkung auf die Bewegung eines Flußschlauches von der Flußschlauchumgebung des betrachteten Flußschlauches ab:

- der erste Flußschlauch erfährt durch die Wechselwirkungskraft während seiner gesamten Lebensdauer nur einen zusätzlichen Antrieb. Er durchläuft die Probe also in kürzerer Zeit als ein einzelner Flußschlauch ohne Nachfolger.
- der letzte Flußschlauch erfährt gerade eine entgegengesetzte Beeinflussung. Er wird von der Wechselwirkungskraft durch seine Vorläufer nur gebremst, durchläuft die Probe also in einer längeren Zeit.
- irgendein Flußschlauch zwischen vielen anderen erfährt beides: nahe dem Nukleationsort hat er viele Flußschläuche vor sich, die ihn bremsen; in der Mitte der Probe bremsen ihn etwa genausoviele Flußschläuche vor ihm, wie inzwischen nach ihm nukleiert wurden und ihn antreiben; danach überwiegt die Zahl der antreibenden. Insgesamt wird sich seine Laufzeit also nicht wesentlich

ändern.

Mit der Änderung der Geschwindigkeit ist natürlich auch eine Veränderung des Spannungshöhe verbunden. Schnellere Flußschläuche erzeugen höhere, langsamere niedrigere Spannungen. Der erste liefert also allgemein erhöhte, der letzte allgemein erniedrigte Spannungen, während ein Mittlerer am Anfang seiner Lebenszeit erniedrigte, am Ende erhöhte Spannungen erzeugt. Dabei ist die Größe dieser Veränderungen durch den Wert des unveränderten Zeitintegrals über das Spannungsprofil (=Flußschlauchinhalt) begrenzt.

Insgesamt ergibt die Berücksichtigung der Wechselwirkungskraft also kein qualitativ neues Profil der von einem einzelnen Flußschlauch erzeugten Spannung. Allerdings wird es - je nach Flußschlauchposition - zeitlich gedehnt oder gestaucht, d.h. die Zeitpunkte der Ereignisse (Nukleation, Vernichtung) werden verschoben.

Für die gesuchte Gesamtspannung, die Summe der Einzelspannungen, ergeben sich daraus drastische Veränderung im zeitlichen Ablauf gegenüber einem Modell mit vernachläßigter Wechselwirkungskraft:

- die ersten Flußschläuche nach dem Spannungseinsatz durchlaufen die Probe in kürzerer Zeit, ihre Vernichtungspulse werden zeitlich nach vorne verschoben.
- folgende Flußschläuche durchlaufen die Probe in etwa in gleicher Zeit, ihre Vernichtungspulse werden praktisch nicht verschoben.
- die letzten Flußschläuche vor Unterschreitung des kritischen Stroms durchlaufen die Probe in längerer Zeit, ihre Vernichtungspulse werden zeitlich nach hinten verschoben.

Im Gegensatz zur zeitlichen Struktur wird die Höhe Gesamtspannung durch die Berücksichtigung der Wechselwirkungskraft kaum beeinflußt. Sie beeinflußt nämlich immer mehrere Flußschläuche in entgegengesetzten Richtungen: die gleiche Kraft, die die Vorauslaufenden antreibt, bremst die Nachfolgenden. Ohne den Geometriefaktor ergäbe sich also gar keine Änderung

der Spannungssumme. Der Geometriefaktor wichtet die Teilspannungen der Flußschläuche aber noch. Auf Grund seiner Ortsabhängigkeit kann sich die gleiche Geschwindigkeitsänderung bei verschiedenen Flußschläuchen unterschiedlich auf die Spannungssumme auswirken. Deutliche Unterschiede sind aber nur dann zu erwarten, wenn sich einer der Flußschläuche in der Nähe des Probenrandes befindet. Auf der Nukleationsseite ist das jeweils der gerade entstehende Flußschlauch, der von seinen Vorgängern gebremst wird; auf der Vernichtungsseite ist es der Flußschlauch, der kurz vor seiner Vernichtung steht und von den Nachfolgenden beschleunigt wird. In beiden Fällen ist also die Richtung der Spannungsänderung so, daß sie ggf. die Charakteristika des bisher erarbeiteten Profils betont.

Zusammenfassend gilt also: der Charakter des Spannungsprofils der Flußschlauchspannung bleibt auch unter Berücksichtigung der Wechselwirkungskraft erhalten: sie setzt mit einer sehr kleinen Spannung ein, die relativ lange in etwa gleich bleibt und endet mit einem großen, scharfen Spannungspuls. Die Dauer dieses Einzelprofils hängt stark von der Position des Flußschlauches in der Ablaufsequenz ab. Die Gesamtspannung ergibt sich durch Superposition dieser Einzelprofile unterschiedlicher zeitlicher Länge.

Eine ausführlichere Betrachtung der Wechselwirkungskraft, die auch die durch sie erzeugte Elastizität einer Flußschlauchkette berücksichtigt, enthält /30/.

3.2.1.2 Die Interpretation der Meßkurven

Mit diesen Überlegungen kann die vorliegende Kurve (Bild 3.4d) so interpretiert werden, daß zunächst ein Flußschlauch nukleiert wird -der erste Spannungssprung bei t=18.7 µs-, die Probe durchläuft und dann vernichtet wird -der erste große Spannungspuls bei t=20.6 µs. Dabei besteht aber die Schwierigkeit, den kurzen Abstand der folgenden Vernichtungspulse zu erklären: die mit der Nukleation entsprechender Flußschläuche verbundenen Spannungssprünge sind

in der Aufzeichnung nicht zu sehen.

Dieser Mangel kann so erklärt werden, daß alle dem ersten folgenden Flußschläuche wegen der nun wirksamen Wechselwirkungskraft langsamer in die Probe eindringen als der erste Flußschlauch, so daß ihre Entstehung keinen bei dieser Auflösung erkennbaren Spannungssprung erzeugt.

Für diese Interpretation sprechen die Ergebnisse von Messungen, bei denen speziell der Spannungseinsatz mit hoher Auflösung untersucht wurde. Bild 3.6 zeigt zwei dabei gewonnene Messungen mit unterschiedlicher Spannungsauflösung. Im zweiten, aus zwei Messungen zusammengesetzten Spannungsprofil (Teilbild b, Auflösung 5-10 nV), ist gerade noch ein zweiter kleiner Spannungssprung von ca. 20 nV bei t=28.3 µs zwischen dem Einsatz der Spannung (t=27.5 µs) und dem ersten Vernichtungspuls (t=28.9 µs) zu erkennen. Er ist bei dieser Interpretation der Messkurven als das Nukleationssignal des zweiten Flußschlauches zu verstehen, während die Nukleation weiterer Flußschläuche von den Vernichtungspulsen vollständig verdeckt wird.

Allerdings ist auch eine andere Interpretation der Kurve d in Bild 3.4 möglich. Reale Proben sind niemals haftkraftfrei. Es kann also durchaus sein, daß beim Unterschreiten des kritischen Stromes im vorhergehenden Meßzyklus nicht alle Flußschläuche die Probe verlassen haben, sondern einige an Haftzentren hängengeblieben sind. So kann trotz des dauernd anliegenden Gleichstroms eine ganze Kette von Flußschläuchen im Flußkanal stehen bleiben. Dies wurde auch magnetooptisch beobachtet /6/.

Setzt man eine solche Situation voraus, so ist der erste Sprung in der aufgezeichneten Spannung als Start der festgehaltenen Flußschläuche bei ständig wachsender Lorentzkraft zu interpretieren, während die Nukleation einzelner Flußschläuche generell nicht sichtbar wird.

Diese Interpretation wiederum wird durch die Aufzeichnung von Spannungspulsen wie im Bild 3.7 gestützt.
Teilbild a zeigt das typische, erwartete Profil der Flußschlauchspannung, an das sich aber keine weiteren Spannungspulse, sondern wieder die Spannung null anschließt. Erst

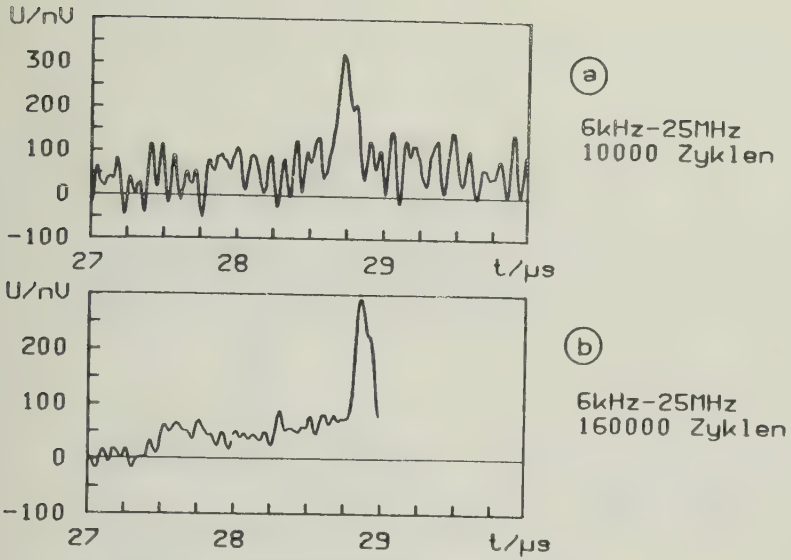


Bild 3.6: Der Einsatz der Flußwanderungsspannung mit mittlerer und hoher Spannungsauflösung (Probe In-4 bei T = 3.00 K)

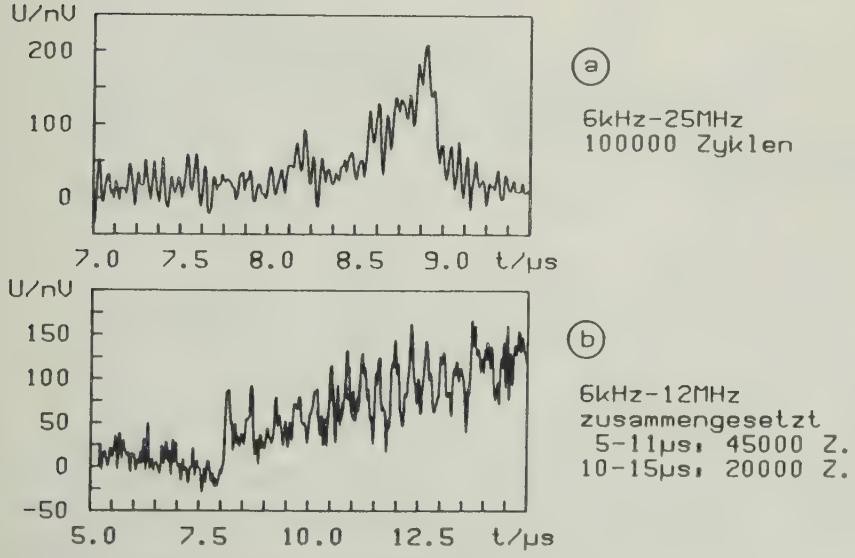


Bild 3.7: Vernichtung eines Flußschlauches vor dem Einsatz des stationären Flußwanderungszustands (a) und Spannungseinsatz mit Flußschlauchvernichtungspulsen (b) (Probe In-4 bei T = 2.5 K (a) und T = 3.33 K (b))

deutlich später (im Bild nicht enthalten) tritt eine beständige Spannung ungleich null auf.

Solche Ereignisse können zwanglos als Vernichtungsprozeß eines zunächst in der Probe festgehaltenen Flußschlauches interpretiert werden: die mit dem Strom steigende Lorentzkraft reißt ihn los und treibt ihn zum Vernichtungsrand, bevor der kritische Strom für den stationären Flußwanderungszustand erreicht ist. Erst nach seiner Vernichtung, bei größeren Stromwerten geht die Probe in den stationären resistiven Zustand über.

Teilbild b stützt diese Interpretation, da sie zwar die Vernichtung einer Vielzahl von Flußschläuchen zeigt (den Anfang der stationären Flußschlauchspannung), aber im Gegensatz zu den bisher besprochenen Messungen setzt hier die Flußschlauchspannung mit einem scharfen, hohen Spannungspuls ein. Dies kann wieder mit der Annahme festgehaltener Flußschläuche erklärt werden: so könnte zunächst ein nahe an der Vernichtungsseite haftender Flußschlauch den Flußkanal blockieren. Sobald der steigende Strom ihn losreißt -was auch seine sofortige Vernichtung bewirkt-, kommt die gesamte bisher blockierte Flußschlauchkette in Bewegung und so wäre praktisch ohne Übergangsphase der stationäre Flußwanderungszustand erreicht.

Zusammenfassend kann gesagt werden: beide Interpretationen des Spannungsprofils Bild 3.4 d sind möglich und werden durch weitere Messungen gestützt. Insgesamt dürften im Laufe mehrerer Messungen beide Abläufe beobachtet worden sein. Allerdings ist eine eindeutige Erklärung der einzelnen Spannungsprofile, die insbesondere auch die Anzahl der beteiligten Flußschläuche enthält, aufgrund der vorgegebenen Meßempfindlichkeit nicht möglich.

3.2.2 Weitere Ergebnisse

Bisher wurde nur der Einsatz der Spannung behandelt. Wie oben erwähnt, sollte auch die Rückkehr der Probe in den supraleitenden Zustand beobachtet werden können. Entsprechende Aufzeichnungen zeigt Bild 3.8. Beide Teilbilder zeigen vollständige Sequenzen vom Einsatz der Spannung, dem stationären Zustand, und dem Ende der Flußschlauchspannung .

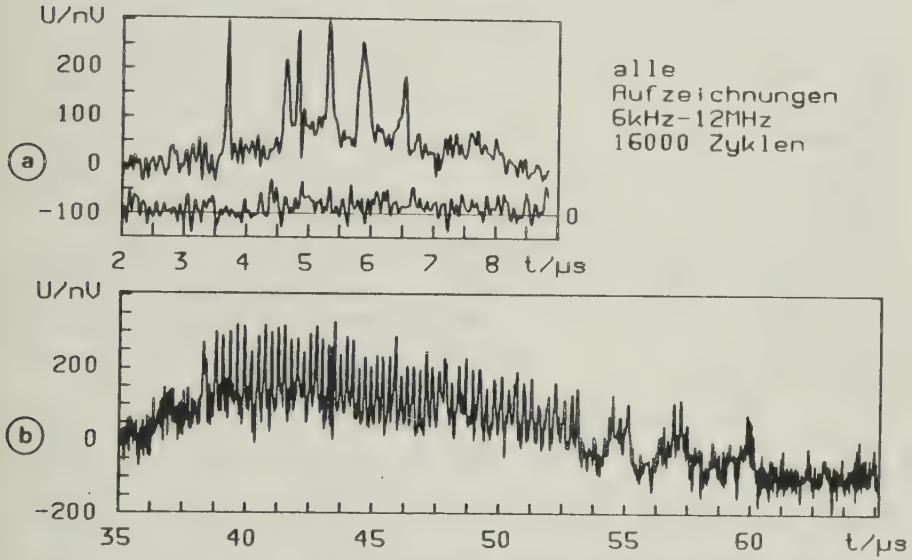


Bild 3.8: Vollständige Zyklen des Flußwanderungszustandes
a: wenige Flußschläuche pro Zyklus mit Vergleichsnullinie
b: über 50 Flußschläuche pro Zyklus
(Probe In-4 bei T = 3.24 K (a) und T = 3.00 K (b))

Bei Teilbild a -hier ist zum Vergleich eine Nullinie mit eingezeichnet- war der Gleichstrom so niedrig, daß nur wenige Flußschläuche pro Zyklus vernichtet und folglich auch generiert wurden. Hier zeigt das Ende der Flußschlauchspannung keine Besonderheit.

Teilbild b hingegen zeigt eine sehr lange Sequenz von über 50 Flußschläuchen. Dabei zeigt sich eine Besonderheit: bei abnehmender Stromsumme scheint die Flußschlauchvernichtung zeitweise auszusetzen.

Dieses Aussetzen ist mit keinem der bisher benutzten Ansätze erklärbar, denn sobald der Flußwanderungsprozeß einmal zum Stehen kommt, gibt es bei abnehmendem Strom, d.h. abnehmender Antriebskraft keinen Grund für ein erneutes Einsetzen der Bewegung.

Dieser Wiederspruch kann leicht erklärt werden, wenn man die angewandte Meßtechnik berücksichtigt. Wie in Kapitel 2 erläutert, kann man einer Meßkurve, die durch Signalmittelung gewonnen wurde, nicht entnehmen, ob sie ein einzelnes Ereignis oder die Mischung mehrerer Ereignisse wiedergibt. So kann das scheinbare Aussetzen der Spannungspulse die Folge einer Überlagerung zweier Abläufe mit kleinen Unterschieden im zeitlichen Abstand der Pulse sein. Zu bestimmten Zeiten überlagern sich die Pulse konstruktiv, zu anderen destruktiv. Diese Komplikation ist vor allem gegen Ende eines relativ langen Zyklus zu erwarten, da sich zeitliche Schwankungen mit wachsendem Abstand vom fixierten Einsatzpunkt (I=Ic) immer stärker auswirken.

Diese Vorstellung wird von Modellrechnungen, die die Möglichkeit einer solchen Mischung miteinbeziehen /11,12/ gestützt. Sie zeigen bei bestimmten Werten des Parametersatzes das gleiche Phänomen. Diese Werte zeichnen sich dadurch aus, daß sie die Grenze zwischen zwei möglichen Abläufen markieren, so daß schon kleinste Schwankungen (z.B. Ic-Schwankungen, Rauschen des Strompulses) die Anzahl der pro Zyklus generierten Flußschläuche ändern.

3.2.3 Zusammenfassung der Ergebnisse

Die zeitaufgelösten Spannungsmessungen am strominduzierten Zwischenzustand zeigten den erwarteten Wechselspannungscharakter der Flußwanderungsspannung. Die Meßkurven konnten z.T. allein mit den beschriebenen Vorstellungen vom Ablauf des Flußwanderungsprozesses, z.T. unter zusätzlicher Verwendung des Haftkraftkonzepts, interpretiert werden.

Bei diesen Interpretationen zeigte sich eine Unbestimmtheit, die ihren Ursprung darin hat, daß es unmöglich ist, aus den gemessenen Spannungsprofilen allein auf die absolute Zahl der beteiligten Flußschläuche und deren Anfangs- und Endkonfiguration zu schliessen. Sie kann also ohne eine zusätzliche, unabhängige Beobachtungsmöglichkeit nicht ausgeräumt werden kann.

Daher war es wünschenswert, die Ergebnisse durch weitere Messungen zu kontrollieren und ggf. durch ein Kombinationsexperiment (z.B. im magnetooptischen Kryostaten) abzusichern. Dieses Thema behandelt das folgende Kapitel.

KAPITEL 4

KONTROLLMESSUNGEN

Bei der Behandlung der Meßanlage wurde darauf hingewiesen, daß das Ergebnis einer Mittelungsmessung mit einer gewissen Unsicherheit behaftet ist und dementsprechend ergaben sich -trotz hochauflösender Messungen- Mehrdeutigkeiten bei der Interpretation der Meßkurven. Beides fordert dazu auf die Ergebnisse durch Kontrollmessungen zu ergänzen.

Dazu gibt es grundsätzlich verschiedene Möglichkeiten:

- Kontrolle des experimentellen Aufbaus, insbesondere der Meßanlage,
- Parametervariation und erweiterte Auswertungen bei unverändertem Aufbau
- Kontrollmessungen mit erweiterten, unabhängigen Meßmöglichkeiten.

Alle diese Möglichkeiten wurden eingesetzt, um die Ergebisse so gut wie möglich abzusichern. Darüber wird in diesem Kapitel kurz berichtet.

4.1 MESSANLAGENBEZOGENE KONTROLLEN

4.1.1 Störunterdrückung bei supraleitender Probe

Das vorgesehene Verfahren der Störunterdrückung benutzt den abrupten Übergang vom supraleitenden zum resistiven Zustand, konnte also bei Zimmertemperatur nicht erprobt werden. So galten die ersten Messungen mit supraleitender Probe der Wirksamkeit des Differenzmeßverfahrens im Experiment.

Es zeigte sich, daß bei der gewählten Ansteuerung der Probe mit Dreieckstrompulsen eine praktisch vollständige Unterdrückung der kohärenten Störungen möglich ist. Bild 3.8a zeigt eine so gewonnene Nullinie. Das sind Differenzsignale, bei denen in beiden Meßphasen mit Sicherheit kein Nutzsignal enthalten ist. Sie zeigen, daß bei den vorliegenden Parameterwerten das Übersprechen in guter Näherung von der Gleichstromhöhe unabhängig ist. Abweichungen davon wurden erst bei etwa 10-fachen Stromwerten beobachtet. Konsequenterweise wurden die meisten Messungen relativ nahe bei Tc d.h. mit kleinen Stromwerten, durchgeführt.

Nebenbei erbrachten diese Messungen eine Bestätigung der Abhängigkeit der Auflösung von der Zyklenzahl, so daß diese jeweils vor einer Messung gut abgeschätzt werden konnte.

4.1.2 Vergleich mit der Gleichspannungsmeßanlage

Neben den Testmessungen mit künstlichen Signalen (siehe Kapitel 2), wurde die korrekte Erfassung des Signalweges (Verstärkungsfaktoren, Dämpfungen durch Filter, Berechnung der Spannungswerte) auch im Einsatz, d.h. bei endgültiger Kabelführung und echtem Signal, überprüft. Das gelang durch den Vergleich der Meßergebnisse mit denen der Gleichspannungsanlage. Sie müssen den Einsatz der Flußschlauchspannung beim Überschreiten des kritischen Stroms in gleicher Höhe anzeigen.

Die Übereinstimmung der Werte zeigt Bild 3.4a,b. Ein Vergleich der gemessenen Ic-Werte kann nur eine grobe Bestätigung erbringen, da dieser Wert von Messung zu Messung um bis zu 10% schwanken kann und die beiden Anlagen nicht gleichzeitig betrieben werden können. Auch der Vergleich des weiteren Signalverlaufs ist nur qualitativ möglich, da die Wechselspannungsanlage eine untere Grenzfrequenz von 6 kHz aufweist, so daß der Gleichspannungsanteil der Signalspannung hier nicht korrekt wiedergegeben wird.

4.2 PARAMETERVARIATION UND ERWEITERTE AUSWERTUNG

4.2.1 Reproduzierbarkeit

Die erste und einfachste Möglichkeit ist, keinen Parameter zu variieren, d.h. die Reproduzierbarkeit einer Messung zu prüfen. Dies erwies sich in der Suchphase der Mittelungsmessungen als wichtig, da hier aus Zeitgründen noch mit relativ schlechter Auflösung gemessen wurde, die Ergebnisse also oft nicht eindeutig interpretierbar waren. Mit diesen Kontrollen konnten sehr viele scheinbare (und vielleicht auch echte, aber instabile) Signale sofort ausgesondert werden. Bild 4.1 zeigt solche Messungen, bei denen die Reproduktion gelang. Sie wurden -ein Extremfall- im Abstand von ca. 30 Min. aufgezeichnet.

Insgesamt zeigte sich, daß die Arbeitspunkte der Proben meistens extrem empfindlich gegen jede Veränderung an der experimentellen Anlage waren, sich aber z.T. als sehr stabil erwiesen, wenn mit entsprechender Vorsicht experimentiert wurde.

Wenn einmal ein stabiler Arbeitspunkt gefunden war -dabei konnte es auf Gleichstromvariationen von z.B. 10µA bei ca. 80mA Gesamtstrom ankommen-, konnten auch länger dauernde, hoch auflösende Messungen durchgeführt werden. Bild 3.6 zeigt eine solche Sequenz von Aufzeichnungen. Oben eine Messung mit geringer Auflösung (Meßdauer 2.7 Minuten), unten die hochauflösende Reproduktion in 2 aufeinander folgenden

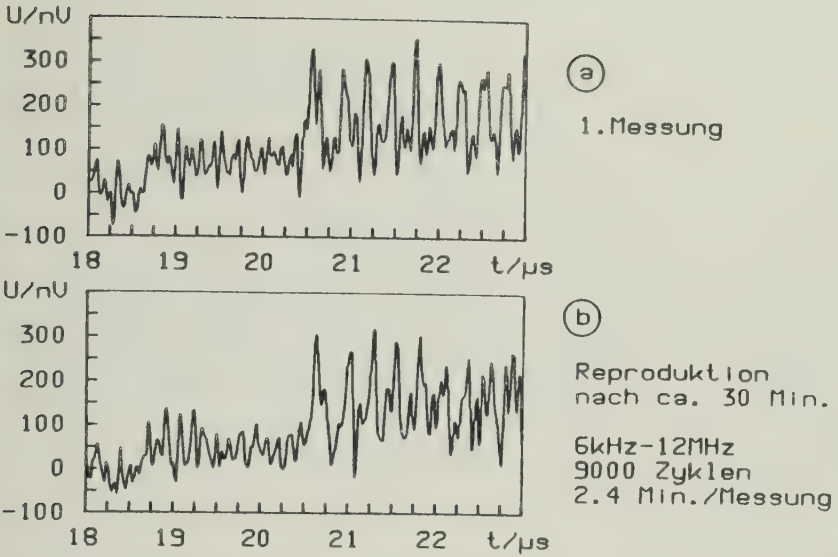


Bild 4.1: Meßkurve und Reproduktion nach ca 30 Minuten (Probe In-4 bei T = 3.00 K)

Messungen von je 14.5 Minuten Dauer.

4.2.2 Vergleich mit der Nullinie

Die nächste -auch noch sehr einfache- Parametervariation ist das vollständige Abschalten des Effekts. Hier heißt das: bei dauernd unterkritischem Strom muß das Signal verschwinden, das Signal wird mit einer Nullinie verglichen (siehe Bild 3.8a). Diese Kontrolle bedeutet natürlich gleichzeitig eine Kontrolle der Störunterdrückung bei laufendem Experiment.

4.2.3 Zeitliche Verschiebung des Spannungseinsatzes

Die Ansteuerung der Probe durch einen Dreieckspuls ermöglicht eine einfache Kontrolle des Signalursprungs. Durch den Gleichstromwert und die Flankensteigung des Strompulses ist der Zeitpunkt festgelegt, zu dem der kritische Strom überschritten wird. Er wird zur Arbeitspunktsuche typischerweise in die Mitte der Flanke gelegt.

Sobald ein stabiles Signal gefunden ist, kann seine Unabhängigkeit von den synchronen Vorgängen in Pulsgenerator und Transientenrekorder dadurch geprüft werden, daß sein Einsatzzeitpunkt durch eine gezielte Gleichstromvariation auf der Zeitachse verschoben wird. Bild 4.2 faßt diesen Vorgang zusammen, es zeigt deutlich die erwartete zeitliche Verschiebung des sonst unveränderten Signals.

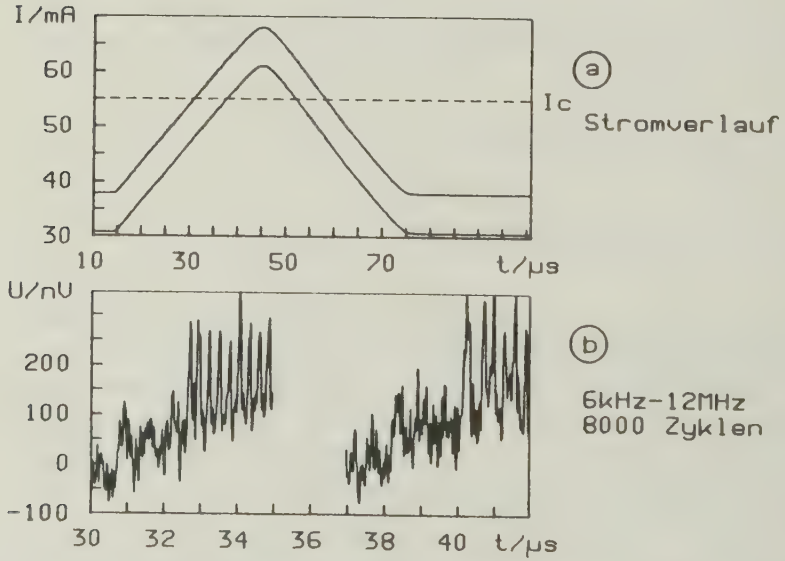


Bild 4.2: Zeitliche Verschiebung des Spannungseinsatzes durch Gleichstromvariation
(Probe In-4 bei T = 3.00 K)

4.2.4 Nukleationsfrequenz als Funktion der Stromsumme

Bei der angewandten Ansteuerung der Probe kann die Spannungs-Frequenz-Relation

$$U = \Phi * f,$$

U = zeitgemittelte Spannung,
Φ = Flußschlauchinhalt,
f = Flußschlauchnukleationsrate,

in eine Zeit-Frequenz-Relation umgesetzt werden. In der Nähe des kritischen Stroms Ic steigt die Spannung an der Probe linear mit dem Strom. Der Strom wiederum steigt während der ansteigenden Flanke der Strompulses zeitproportional, während der fallenden Flanke sinkt er zeitproportional. Insgesamt gilt also

$$U = \Phi * f \sim I \sim t.$$

Bei konstantem Flußschlauchinhalt (siehe Einleitung und 4.3.1) muß ein Diagramm f(t) gerade die Form des Strompulses wiedergeben.

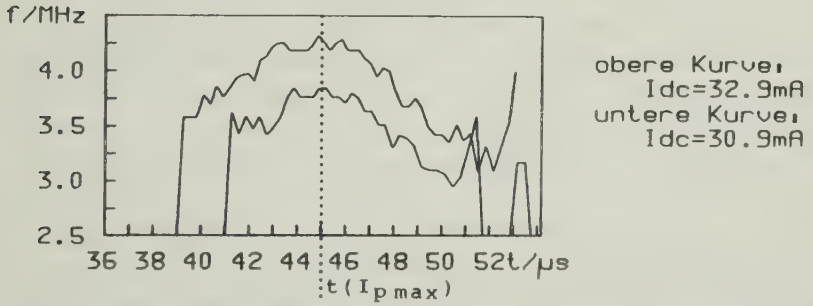


Bild 4.3: Zeit-Frequenz-Diagramme der Flußwanderungsspannung bei Ansteuerung mit Dreieckstrompulsen
(Probe In-4 bei T = 3.00 K)

Bild 4.3 zeigt solche Diagramme. Dazu wurden die zeitlichen Abstände der Spannungspulse abgelesen, invertiert und geglättet. Die Glättung verringert die Auswirkung zufälliger Fehler bei der Erfassung der Pulszeitpunkte. Offensichtlich gibt das Ergebnis in etwa die Stompulsform wieder.

Solche Kurven hängen vom gewählten Arbeitspunkt Idcl ab: je höher der Gleichstrom, desto früher wird der kritische Strom Ic überschritten und desto höhere Frequenzen werden während des Meßzyklusses erreicht.

Auch diese Wirkung der Parameteränderung Idc konnte beobachtet werden. In Bild 4.3 sind die f(t)-Kurven zweier verschiedener Messungen eingezeichnet. Dabei wurde die Obere aus einer Aufzeichnung gewonnen, bei der der Gleichstrom um 2 mA höher war, als bei der Messung, die zur unteren Kurve führte.

4.3 KONTROLLEN DURCH ERWEITERTE MESSUNGEN

4.3.1 Gleichspannungsmessungen

Bisher wurde die Gleichspannungsmessung nur zur Bestimmung eines möglichen Arbeitspunktes eingesetzt. Sie enthält aber noch mehr Information. So enthält sie z.B. zu jedem Stromwert die zeitgemittelte Spannung und auch den differentiellen Widerstand der Probe im Flußwanderungszustand.

Die Gleichspannungsmessung kann als zusätzliche, unabhängige Messung aufgefaßt werden und ermöglicht so eine Kontrollauswertung, bei der der Flußschlauchinhalt auf zwei Arten bestimmt wird und die Ergebnisse miteinander verglichen werden.

Die erste Berechnung benutzt die Spannungs-Frequenz-Relation. Aus der Wechselspannungsmessung wird die Nukleationsfrequenz in Abhängigkeit vom Strom ermittelt, aus der Gleichspannungsmessung der zugehörige Wert der zeitgemittelten Spannung. Bei dieser Auswertung geht die Größe der Wechselspannung nicht ein, die Apparatur dient hier als reiner Flußschlauchzähler.

Die andere Berechnung des Flußinhalts benutzt die grundlegende Relation zwischen Spannungsstoß und Flußmenge

$$\int U(t)\, dt = \Phi$$

Dazu werden geeignete Teile der gemessenen Zeit-Spannungs-Kurve integriert. Hier wird also gerade der oben unbenutzte

Teil der Wechselspannungsmessung, die Höhe der gemessenen Spannung ausgewertet.

Die beiden Auswertungen ergeben eine Übereinstimmung bis auf den Faktor 2 oder besser. Die Abweichungen überraschen nicht, da die zweite Auswertung nur grob erfolgen kann: es ist unmöglich, den Spannungsbeitrag einzelner Flußschläuche aus der Meßkurve zu extrahieren, das Ergebnis der Integration wird also immer von der gewählten Interpretation der Meßkurve abhängen.

Es bleibt anzumerken, dass sich hier nochmals die hohe Leistungsfähigkeit der Meßanlage zeigte: bei einigen Messungen nahe Tc konnten Flußschläuche mit einem Inhalt von nur 5-10 Flußquanten nachgewiesen werden.

4.3.2 Magnetooptische Beobachtung

Als nahezu ideale unabhängige Kontrolle bietet sich die direkte magneto-optische Beobachtung des Geschehens in der Probe an. Sie könnte gerade die größten Unsicherheiten -Regelmäßigkeit des Ablaufes, Anzahl der Flußschläuche- beseitigen.

In der Praxis stehen dieser idealen Kontrolle zwei Dinge entgegen:

- die magnetooptische Beobachtung erfordert einen erheblichen experimentellen Aufwand. Insbesondere erfordert sie die Verwendung eines optischen Kryostaten, der die Beobachtung der Probe mit einem Mikroskop ermöglicht, und eine leistungsstarke, elektronisch schaltbare polarisierte Lichtquelle. Die Apparatur kann also nicht zur Spannungsmessanlage gebracht werden, sondern diese muß an die magnetooptische Appartur angeschlossen werden. Dies führt im allgemeinen (siehe Kapitel 2) zu einer starken Begrenzung der erreichbaren Zeitauflösung (nicht ausreichende elektro-magnetische Abschirmung).

- dynamische Prozesse bei der Flußwanderung werden immer stroboskopisch beobachtet, da sie für eine direkte Beobachtung viel zu schnell ablaufen. Pro Meßzyklus wird die Probe also nur sehr kurzfristig beleuchtet, den Rest der Zykluszeit liegt sie im Dunkeln. Diese Ansteuerung ergibt ein kleines Tastverhältnis Hell/Dunkel, was das Auge als eine geringe mittlere Helligkeit wahrnimmt. Bei einer Ansteuerung wie bei den in Kapitel 3 beschrieben Messungen wird die für direkte Beobachtung nötige Mindesthelligkeit bei weitem unterschritten.

  Die nötige Mindesthelligkeit kann prinzipiell nicht durch die Erhöhung der Intensität oder der Dauer der Lichtpulse erzwungen werden, da die Einwirkung des Lichts auf die Probe vernachlässigbar bleiben soll und eine zeitliche Mindestauflösung erforderlich ist. Es bleibt also nur die Verringerung der Dunkelzeit, der Meßzyklus muß erheblich verkürzt werden.

  Im Endeffekt bedeutet das, daß die magnetoopische Beobachtung nur bei synchronisiertem Flußwanderungsprozeß möglich ist. Dabei wird nicht der Flußwanderungszustand an- und abgeschaltet, sondern im stationären Flußwanderungszustand wird die Erzeugung der einzelnen Flußschläuche getriggert.

Insbesondere durch den letztgenannten Umstand ist ein direkter Vergleich solcher Messungen mit den bisher Besprochenen nicht möglich. Bei stationärem Betrieb kann ja weder der Einsatz noch das Ende des Flußwanderungszustandes erfaßt werden.

Ähnlich verhält es sich mit dem Spannungsprofil eines einzelnen Flußschlauches. Wenn sich immer mehrere Flußschläuche gleichzeitig im Flußkanal befinden, kann es nicht isoliert erfaßt werden.

Trotz dieser Schwierigkkeiten haben die kombinierten magnetooptischen und elektrischen Untersuchungen eine prinzipielle Bedeutung: die Regelmäßigkeit und Eindeutigkeit des Ablaufs pro Meßzyklus werden schon vor der Spannungsmessung gesichert und die Interpretation der gemessenen Spannungsprofile wird durch diese gesicherte

Kenntnis eindeutig.

Die so durchgeführten Messungen /30/ erbrachten klar die erwartete Bestätigung des Zusammenhangs zwischen Flußschlauchbewegung und gemessener Spannung. Dabei wurde die -zumindest im Synchronisationsbetrieb große- Wirkung der Wechselwirkungskraft deutlich erkennbar: selbst bei einer Kette von vier Flußschläuchen reagiert noch der Letzte auf den Vernichtungsvorgang des Ersten mit einer deutlichen Geschwindigkeitsänderung.

4.3.3 Geänderte Meßkreisgeometrie

Bisher wurde die Diskussion der erwarteten und gemessenen Spannungsprofile bewußt auf die konventionelle Anordung der Spannungskontakte beschränkt. Wie aber schon in der Einleitung angedeutet, hängt das erwartete Spannungsprofil stark von der Meßkreisgeometrie ab /15/. Änderungen der gemessenen Zeit-Spannungs-Kurven bei geänderter Meßkreisgeometrie sind also ein deutlicher Indikator für den Ursprung der Spannung und die Gültigkeit des theoretischen Modells.

Die von Clem vorgeschlagene neue Kontaktgeometrie ist in Bild 4.4 skizziert. Wesentlich daran sind die geringe Breite (<< Probenbreite) des Spannungsabgriffs und sein geringer Abstand (µm-Bereich) zur Probenoberfläche. Diese Geomtrie unterscheidet sich in ihrer Wirkung von der konventionellen Kontaktgeometrie dadurch, daß sie nur für Flußschlauchbewegungen unmittelbar unter dem Spannungsabgriff empfindlich ist, während die konventionelle Geometrie Flußbewegungen im gesamten aktiven Bereich der Probe registriert.

Aus diesem Unterschied resultieren dann Unterschiede der zu messenden Spannung sowohl im Zeitpunkt als auch im Profil der erwarteten Spannungspulse. Diese Unterschiede konnten kürzlich nachgewiesen werden /21/. Bild 4.5 zeigt zwei solche Zeit-Spannungs-Kurven, die mit den verschiedenen Meßkreisgeometrien an einer Probe aufgezeichnet wurden. Sie

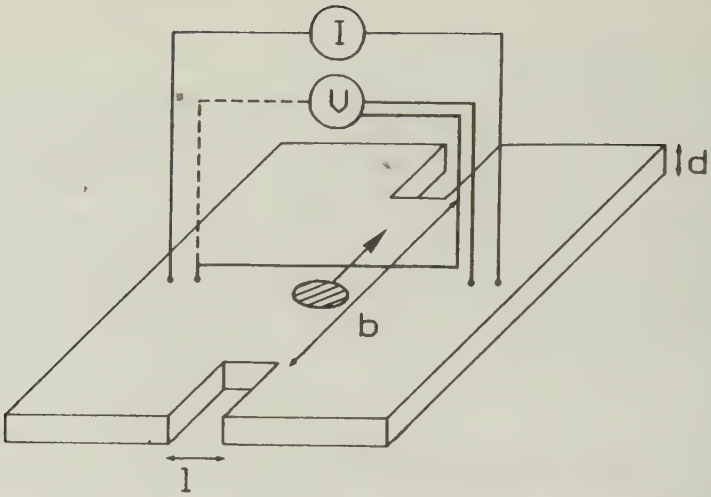


Bild 4.4: Alternative Spannungskontaktgeometrie.
Die Standardgeometrie ist gestrichelt eingezeichnet. Bei der Standardgeometrie werden die Leitungen möglichst weit entfernt von der Probenoberfläche geführt. Im Gegensatz dazu verläuft bei der alternativen Geometrie eine Leitung möglichst nahe der Probenoberfläche parallel zur Stromrichtung. Außerdem muß diese Leitung wesentlich schmaler als die Kanalbreite b sein.

zeigen deutlich die zeitliche Verschiebung und andeutungsweise auch die geänderte Form der Spannungspulse. Weitere Einzelheiten zu diesen Messungen und ihrer Interpretation enthält Penner et al./21/.

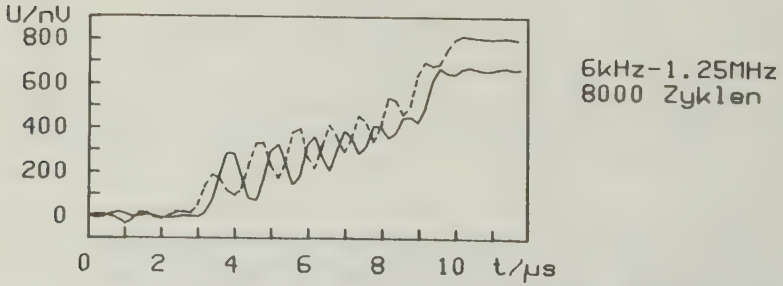


Bild 4.5: Spannungsprofile mit alternativer (durchgezogen) und Standardkontaktgeometrie (gestrichelt)

KAPITEL 5

ZUSAMMENFASSUNG

5.1 ZUSAMMENFASSUNG

Motiviert durch eine theoretische Analyse der Flußschlauchdymamik in Supraleitern mit großem Entmagnetisierungsfaktor /14,15/ sollte das zeitabhängige Spannungsprofil wandernder Flußschläuche direkt gemessen werden. Das erforderte - da sehr niedrige aber zeitlich stark strukturierte Signale erwartet wurden - die Entwicklung einer hochempfindlichen Meßanlage zur Aufzeichnung sehr kleiner Spannungen mit hoher Zeitauflösung.

Sie wurde realisiert durch die Verbindung eines Transientenrekorders BIOMATION 8100 mit einem Prozessrechner PDP 11/04 zu einer digitalen Multipoint Averaging Anlage und ihre Integration in eine geeignete Umgebung. Als geeignete Umgebung erwies sich

- Signalerzeugung und Vorverstärkung in einer Abschirmkammer
- erdschleifenfreier Aufbau von Probenansteuerung und Signalabgriff

- ein Versuchsablauf, der die Unterdrückung kohärenter Störungen durch hochpräzise Differenzmessungen erlaubte.

In dieser Umgebung wurde bei einer nominellen Zeitaufloesung von 10 ns (Verarbeitungsbandbreite 6 kHz bis 25 MHz) eine Spannungsauflösung von wenigen Nanovolt erreicht.

Mit dieser Anlage konnte die Zeitstruktur der Flußwanderungsspannung in Typ I Supraleitern gemessen werden. Insbesondre konnte auf Grund des sehr speziellen Versuchsablaufs (Differenzmessung) das zeitliche Spannungsprofil ganzer Zyklen "supraleitend -> strominduzierter Widerstand -> supraleitend" aufgezeichnet werden.

Die gemessenen Spannungsprofile konnten mit Hilfe von Modellrechnungen in Übereinstimmung mit dem theoretischen Modell interpretiert werden. Dabei zeigte sich allerdings, daß bei nicht idealen Proben der mögliche Pinning-Effekt eine eindeutige Interpretation nicht zuläßt, da er eine Ungewissheit über die Ausgangssituation der Probe erzeugt.

Die Ergebnisse der Spannungsmessungen wurden auf verschiedene Weise (Prüfung der Meßanlage, Reproduktion der Meßkurven, Vergleich mit Nullinien) abgesichert. Neben diesen direkten Kontrollen erbrachten weiterführende Messungen deutliche Bestätigungen der Ergebnisse. Hier ist besonders auf die Messungen /21,30/ hinzuweisen, bei denen die Ungewissheit über die Ausgangssituation der Probe beseitigt werden konnte:

- bei den Messungen mit gleichzeitiger magnetooptischer Beobachtung /30/ kann die Flußkonfiguration in der Probe vor und während der Spannungsmessungen direkt beobachtet werden,
- bei den Messungen mit zwei verschiedenen Geometrieen der Spannungsabgriffe /21/ kann die Anzahl der aktiven Flußschläuche aus einem der Spannungsprofile extrapoliert werden.

Insgesamt wurden die gesteckten Ziele also erreicht, insbesondere auch in den Punkten, deren Realisierbarkeit zu Beginn der Arbeit noch unsicher war.

Da hierbei keine Effekte auftraten, die eine grundlegende Revision oder Erweiterung des benutzten Modells erforderten, kann die vorliegende Arbeit als ein Schlußpunkt bezüglich des Themas angesehen werden.

Unter dem Blickwinkel der Benutzbarkeit kann das Erreichte aber durchaus als Grundlage weiterer Forschung aufgefaßt werden:

- die entwickelte Meßanlage ist so vielseitig einsetzbar, daß sie schon unverändert bei Experimenten zu verschiedensten Themen benutzt werden kann. Zudem kann ihr Einsatzbereich durch geeignete Modifikationen noch deutlich erweitert werden (siehe Kapitel 2).
- auf der Basis des hier erarbeiteten Wissens über den Flußwanderungsprozeß sind auch Entwicklungen auf diesem Gebiet möglich. So können sich etwa Arbeiten anschliessen,
  - deren Schwerpunkt Messungen an bestimmten Probengeometrien, Materialien usw. bilden,
  - die den Übergang von der Flußschlauch- zur Flußlinienbeobachtung durch Geometrie- oder Materialvariation untersuchen /34/,
  - die die bewegten Flußschläuche als Werkzeug bei der Bearbeitung anderer Themen (z.B. Bestimmung der Pinningverteilung im Supraleiter) einsetzen /35/.

ANHANG

A.1 FREQUENZVERHALTEN DES MITTELUNGSPROZESSES

In Kapitel 2 wurde erwähnt, daß das Ergebnis einer realen Mittelungsmessung mit endlicher Triggerunsicherheit in der Bandbreite eingeschränkt ist gegenüber der Originalbandbreite des Signalweges. Im Folgenden wird gezeigt, daß diese Filterwirkung des Mittelungsverfahrens als Wirkung eines 'Moving-Average-Filters' beschrieben werden kann.

1. Bezeichnungen:
   - Die korrekten Spannungswerte zu den Zeitpunkten ti, ti+1, ti-1, ti+2 ... werden mit Vi, Vi+1, Vi-1, Vi+2 ... bezeichnet. i sei die Nummer des Speicherplatzes (z.B. Zeile einer Tabelle), in dem bei absolut korrekter Messung der Spannungswert Vi abgelegt wird.
   - Ui, Ui+1, Ui-1, Ui+2 ... bezeichnet die Werte, die nach Abschluß der Messung in den Speicherplätzen i, i+1, i-1, i+2 ... gespeichert sind.

2. Annahme über die Triggerunsicherheit:
   - Die Triggerunsicherheit sei rein zufällig.
   - Der maximal auftretende Tiggerfehler betrage n Abtastintervalle.
   - Die Wahrscheinlichkeit eines Fehltriggerns um k Abtastintervalle sei pk.

3. Bei wiederholter Messung wird wegen 2. dem Speicherplatz i nicht jedesmal der Spannungswert Vi zugeordnet, sondern immer wieder einmal auch die Werte Vi+1 (ein Abtastintervall zu spät getriggert), Vi-1 (ein Abtastintervall zu früh getriggert), Vi+2 ... .

4. Das Ergebnis einer Messung hängt natürlich von der Verteilung der verschiedenen Fälle auf die M Meßzyklen ab. Bei einer Messung mit M Meßzyklen, bei der dem Speicherplatz i
   1. mi mal der Wert Vi
   2. mi+1 mal der Wert Vi+1
   3. mi-1 mal der Wert Vi-1
   4. ..
   5. ..

   zugeordnet wurde, gilt für das Ergebnis der Messung:

$$U_i = \frac{1}{\ldots + m_{i-1} + m_i + m_{i+1} + \ldots} \cdot$$

$$\cdot \left(\ldots + m_{i-1} \cdot V_{i-1} + m_i \cdot V_i + m_{i+1} \cdot V_{i+1} + \ldots \right)$$

$$= \frac{1}{M} \sum_{k=i-n}^{i+n} m_k \cdot V_k$$

5. Bei verschiedenen Messungen werden sich wegen des Zufallscharakters der Triggerunsicherheit im allgemeinen verschiedene Verteilungen der Triggerabweichungen ergeben, d.h. die Variablen mi, mi+1, mi-1, ... werden verschiedene Werte annehmen. Eine exakte, allgemeingültige Aussage über das einzelne Endergebnisse ist also nicht möglich.

6. Der Zufälligkeitscharakter der Triggerabweichungen lässt aber eine Aussage darüber zu, wie eine Messung mit M Zyklen im Mittel beeinflußt wird.
   - Es gilt

$$U_i = \frac{1}{M} \cdot \sum_{k=i-n}^{i+n} m_k V_k = \sum_{k=i-n}^{i+n} \frac{m_k}{M} \cdot V_k$$

   - (mk)/M ist die Häufigkeit hk, mit der der Spannungswert Vk dem Speicherplatz i zugewiesen wurde.
   - für große Stichproben (M groß) gilt in guter Näherung hk = pk.
   - es folgt

$$U_i \approx \sum_{k=i-n}^{i+n} p_k \cdot V_k$$

7.
   - Dieser Term ist von der Stichprobengröße (Zyklenzahl M) unabhängig, d.h. wenn M groß ist, ist die genaue Zahl M für die Filterwirkung des Mittelungverfahrens nicht wichtig.
   - Die Summe ist identisch mit der Konvolutionssumme /17/ eines 'Moving-Average-Filters' mit den 2n+1 Filterkoeffizienten pk, pk+1, pk-1, ...

A.2 PRETRIGGERMODE

Die Speicherung der aufgezeichneten Werte im Transientenrekorder erfolgt in einem digitalen Schreib/Lesespeicher, bei dem jeder Speicherplatz unabhängig von den anderen ausgelesen und beschrieben werden kann. Die einmal gespeicherten Werte sind also nicht an einen festen Speicherplatz gebunden, sondern können innerhalb des Speichers transportiert werden. Das ermöglicht die Aufzeichnung in einem besonderen Mode, dem Pretriggermode.

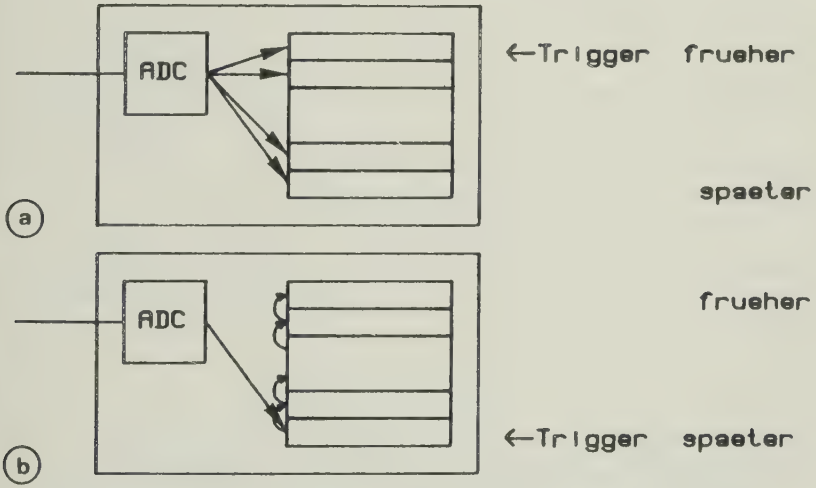


Bild A2.1: Speicherung der Daten im Transientenrekorder im Normalbetrieb (a) und im Pretriggermode (b)

In diesem Mode leitet schon das Armierungssignal den Aufzeichnungsprozess ein. Die gewonnenen Daten werden aber nicht wie beim Normalbetrieb vorne, sondern hinten in den Speicher geschrieben und mit jedem Aufzeichnungsintervall um einen Speicherplatz nach vorne geschoben (siehe Bild A.2.1). Das Triggersignal meldet, wann die Aufzeichnung beendet werden soll. Als Ergebnis steht im Speicher also der Zeitverlauf des Signals unmittelbar vor dem Triggerereignis.

Damit wird ein Zeitintervall vor und während des Triggerereignisses der Messung zugänglich. Das maximal aufzeichenbare Zeitintervall vor dem Triggerzeitpunkt ist dabei etwa Speichergrösse mal Abtastintervall; mit geeigneter Triggerverzögerung kann der Triggerzeitpunkt an jede Stelle des Speichers plaziert werden.

A.3 SCHALTUNG DES OPTOKOPPLERS

Der Optokoppler dient zur erdfreien Versorgung der Probe mit Strompulsen. Dem entsprechend sind Eingangs- und Ausgangskreis elektrisch weitestgehend getrennt: sie sind galvanisch getrennt, so daß zwischen ihnen lediglich Verbindungen über die Lichtstrecke und parasitäre Kapazitäten und Induktivitäten bestehen.

Der Optokoppler IL5 überträgt den Strom im Eingangskreis optisch auf seine Ausgangsseite. Da der maximale Ausgangsstrom des Optokopplers für die Versorgung des Experiments nicht ausreicht, wird er nachverstärkt. Mit der Schaltung in Bild A3.1 wird ein Ausgangsstrom von etwa 150 mA maximal erreicht.

Aufgrund der Übertragungsart (IR-Diode) können nur unipolare Ströme übertragen werden.

Die Zuleitungen der Stromversorung (Autobatterie) enthalten zum Schutz gegen externe Störungen noch Tiefpässe direkt am Schaltungseingang.

Die gesamte Schaltung ist in ein Messinggehäuse mit BNC-Anschlüssen eingebaut.

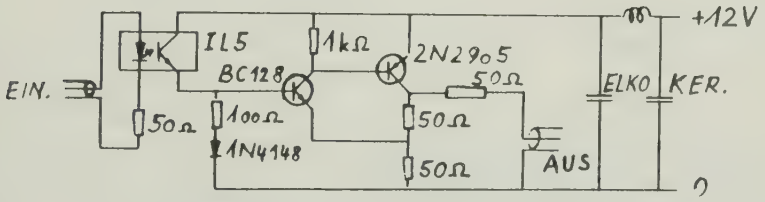


Bild A3.1: Schaltung des Optokopplers zur Strompulsversorgung

A.4 FILTER ZUR BANDLIMITIERUNG

Zur Bandlimitierung des Eingangssignals des Transientenrekorders braucht man Tiefpässe, deren Grenzfrequenz dem jeweiligen Abtastintervall angepasst ist. Dazu wurden Doppel-T-LC-Filter gebaut.

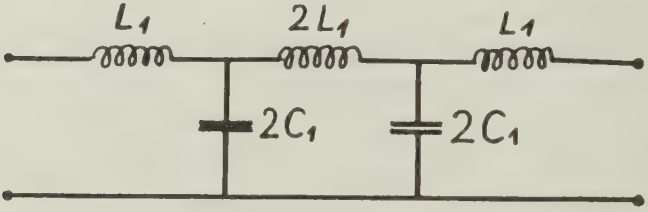


Bild A4.1: Schaltung der Doppel-T-Filter zur Bandlimitierung des Spannungssignals.

Zur Berechnung wurden folgende Formeln verwendet:

$$L_1 = \frac{R}{2\pi f}$$

$$C_1 = \frac{1}{2\pi f R}$$

f: Grenzfrequenz
R: Wellenwiderstand

Dabei wurde ein Wellenwiderstand von 50 Ohm und als Grenzfrequenz jeweils 1/4 der Abtastrate angesetzt.

Für den Aufbau wurden dann Standardbauteile, die den berechneten Werten möglichst nahe kamen, verwendet. Die Filter wurden in Messinggehäuse mit BNC-Anschlüssen eingebaut.

Dämpfung und Grenzfrequenz der Filter wurden mit einem Spektrumanalysator überprüft und ggf. durch Zuschalten kleiner Kapazitäten korrigiert.

Die aufgeführten Formeln sind /36/ entnommen. Sie sind im Abschnitt B.15 (Einfache Kompensationsschaltungen) in einer Tabelle aufgeführt, ergeben sich aber auch aus den Gleichungen des Abschnitts B.18 (Einfache Filter) des Kapitels Schaltungen aus konzentrierten Elementen.

A.5 KOPPLUNG TRANSIENTENREKORDER-I/O-REGISTER

I/O-REGISTER			REKORDER	
Pin	Name		Name	Pin

Logikdefinition

für O-Reg.:	L=1	1--------		10
für TR-Adr.:	H=0	0--------	log.	20
		0--------	-	21
		0--------	def.	22
für ORI:	Anforderung=H	1--------	-	23
für IRI:	Daten bereit=L	1--------	field	24
für I-Reg.:	L=1	1--------		25

Durch die Verdrahtung (offen, Masse) im 'logic-definition-field' des Transientenrekorders werden Signalpegel (H/L), die der Rekorder ausgibt eingestellt. Seine Signale können so den Erfordernissen des angeschlossenen Gerätes angepaßt werden.

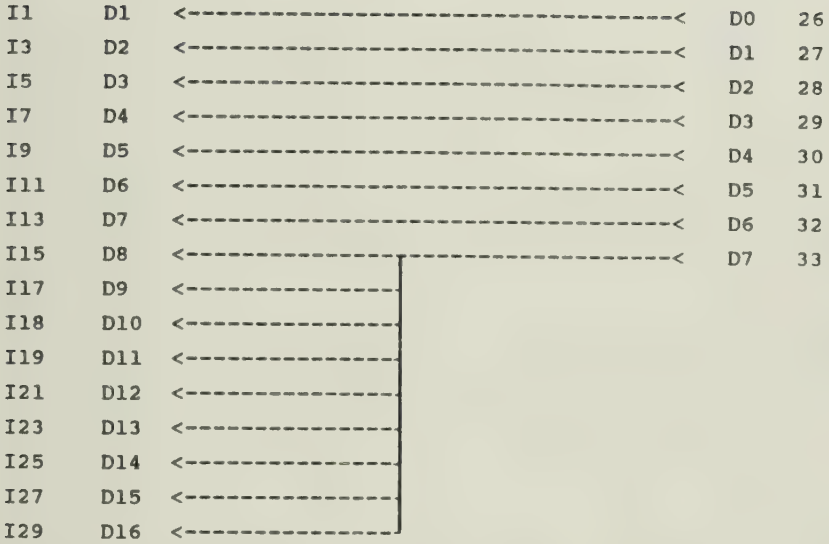
Kontrolle

Über beide Leitungen kann vom Rechner abgefragt werden, ob der Rekorder eingeschaltet ist.

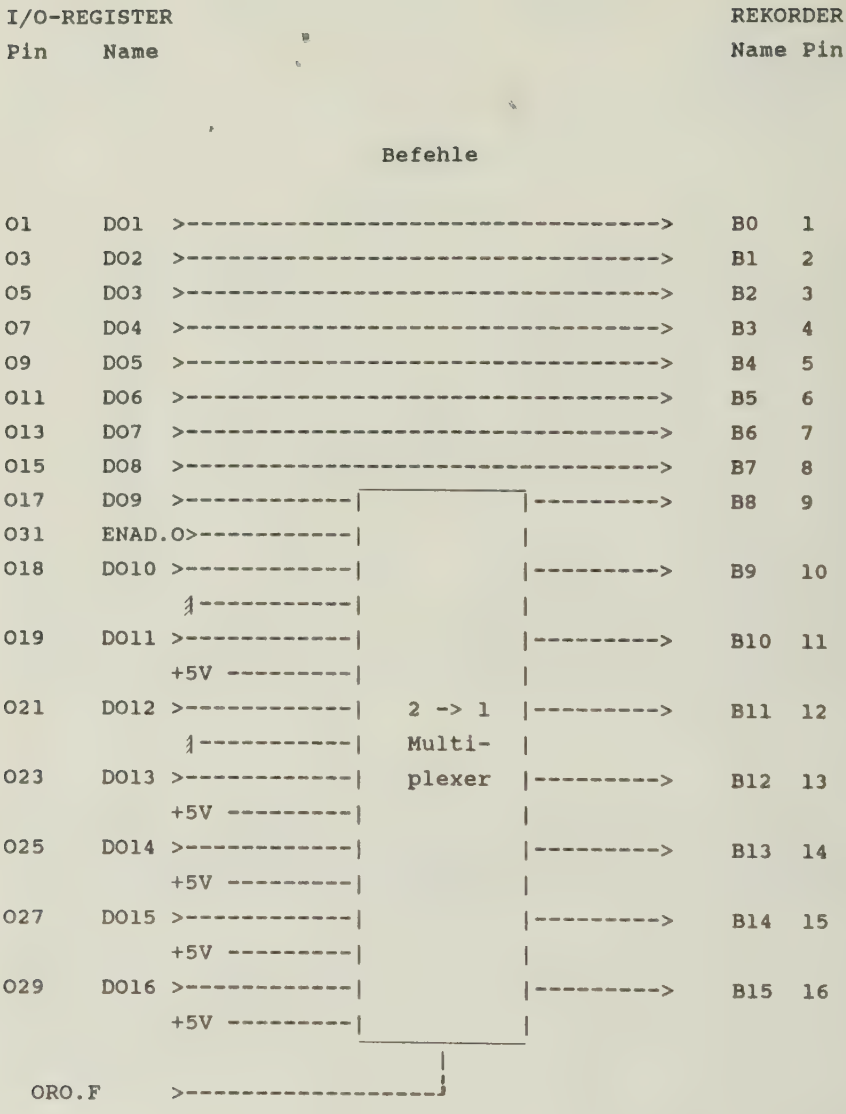
I/O-REGISTER
Pin Name

REKORDER
Name Pin

Messwerte



Der Rekorder gibt die Messwerte als Integerzahlen (8 Bit) in Zweier-Komplement-Darstellung aus. Sie werden durch direkte Verdrahtung auf 16 Bit (Rechnerwortlänge) expandiert.



Bei den Befehlen muß zwischen statischen und getriggerten Befehlen an den Rekorder unterschieden werden. Statische Befehle schalten den Rekorder in eine bestimmte Betriebsart und sind wirksam solange sie anliegen. Getriggerte Befehle

hingegen lösen Einzelaktionen des Rekorders aus; Trigger ist dabei das Signal ORO -> CMD.

Die statischen Signale erzeugt die Kopplungselektronik, während getriggerte Befehle vom Output-Register erzeugt werden. Es muß also zwischen diesen beiden Signalquellen hin und her geschaltet werden.

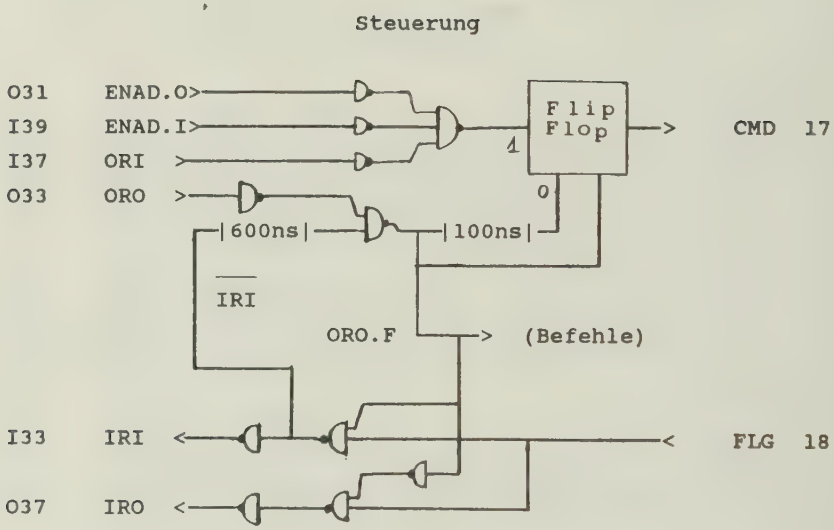
Im Grundzustand ist ORO.F H (siehe Steuerung): die statischen Signale liegen am Rekorder an. Ein Ausgabebefehl des Outputregisters schaltet ORO und damit ORO.F um. Dann liegen alle 16 Ausgabeleitungen des Output-Registers an den B-Leitungen des Rekorders.

Die Rückkehr von ORO in den Grundzustand nach der Datenübergabe an den Rekorder schaltet auch den Multiplexer wieder zurück, so daß wieder die statischen Signale am Rekorder anliegen.

ENAD.O ist das statische Signal des Output-Registers. Es steht nach der Initialisierung auf H und schaltet so den Rekorder auf Status-Ausgabe. Wird ENAD.O auf L gesetzt (vom Programm), so schaltet es den Rekorder um auf Datenausgabe.

I/O-REGISTER | REKORDER

Pin Name | Name Pin



CMD ist das Eingangs-Steuersignal des Transientenrekorders. Es kann vom Input-Register (ORI) oder vom Output-Register (ORO) gegeben werden.

Im ersten Fall ist es eine DATENANFORDERUNG: das Input-Register verlangt die Ausgabe eines Datenwortes.

Dies ist der Grundzustand des Input-Registers, der aber nicht andauernd an CMD anliegen darf, das sonst der Rekorder dauernd im Ausgabemodus gehalten würde. Dieser Zustand wird durch ENAD.I verhindert. Es ist im Grundzustand H, blockiert also den Signalweg ORI->CMD. Erst wenn ENAD.I an passender Stelle auf L geschaltet wurde, gelangt die Datenanforderung ORI nach CMD.

Da der Rekorder für die Datenausgabe statisch auf 'Enable Output Data' geschaltet sein muß, wird die Verbindung ORI->CMD zusätzlich durch ENAD.O kontrolliert. Auch hier blockiert der Grundzustand (ENAD.O H: Rekorder auf Statusausgabe geschaltet) die Verbindung zwischen ORI und CMD. So wird

verhindert, daß Statuswerte fälschlich als Datenwerte eingelesen werden können. Daten können also nur dann angefordert werden, wenn der Rekorder auf Datenausgabe umgeschaltet ist (ENAD.O L, siehe Befehle).
Im zweiten Fall (ORO) ist es ein BEFEHLSSIGNAL an den Rekorder, das die Ausführung eines an den B-Leitungen anliegenden Befehles anstößt. Dieser Fall tritt ein, wenn das Output-Register Daten ausgibt und dann ORO als Data ready Signal nach L schaltet.
ORO schaltet (siehe Befehle) die Multiplexer in den B-Leitungen um, den Zugang zu CMD auf sich selbst und FLG auf IRO, und nach ausreichender Wartezeit sich selbst auf CMD. Sobald FLG das Ende der Befehlsausführung an IRO meldet, schaltet ORO nach H und alle Umschaltungen werden rückgängig gemacht.
Die beschriebene Sequenz ist vom Zustand des Input-Registers und des Rekorders unabhängig, kann also jederzeit ausgeführt werden. So kann jederzeit vom Progamm her auf den Rekorder zugegriffen werden, auch in kritischen Situationen (z.B. programmierte Fehlerbehandlung). Damit bei solchen -eventuell asynchronen Prozessen- ein laufender Datentransfer vom Rekorder zum Input-Register nicht gestört wird, wird ORO bei jedem Transfer von FLG blockiert und erst nach einer Verzögerung, die den normalen Abschluß des Transfers ermöglicht, wieder frei gegeben.

PROBEN

Probe		K.S.-alt	In-1	In-2	In-3	In-4	In-5	In-6	In-8
Präparation		Faden	Faden	Faden	Faden	Faden	Lift-off	Lift-off +ätzen	Lift-off
Breite b	[um]	250	254	202	280	43	8.5	9.8	58
Länge l	[um]	6	8.4	3.4	4.7	5.5			
Dicke d	[um]	2.1	2	2.0	2.0	2.0	1.8	1.2	1.8
Kanaltiefe	[um]	0.5	1.2	1.2	0.5	0.5	0	0.6	0
RRR		100	330	150	260	143	145	168	125
Mess-temperaturen	[K]		3 3.2 3.2 3.0	2.4 3.0 3.0	3.35 3.24	3.0	2.99 1.98	3.0	3 3.39

A.7 GERÄTE

Stromquellen	"Klaus" (Eigenbau: I: 0<I<1mA II: 0<I<1A)
	"Willi" (Eigenbau: 0<I<0.5A, 2 Einstelleinheiten
Sweeper	"Reinhold" (Eigenbau: kann Stromquelle "Willi" steuern)
Puls-generatoren	M5715
	Wavetek 183 mit Quarz
Verstärker	Keithly 140 (Nanovoltverstärker)
	Trontech W20ATC
	Avantek 461/462/463
Digital-multimeter	Gould alpha III
	Keithly 192
	Keithly 195
Schreiber	HP 7045-A
Oszilloskope	HP 1220A
	Hameg HM512
	Tektronix 455
Stromzange	Tektronix P6021
Transienten-rekorder	BIOMATION 8100
Spektrum-analysator	Marconi TF2370
Rechner	PDP 11/04 unter RT-11
	mit DSD440 Doppel-Diskettenlaufwerk
	und einem CAMAC-Crate

Sichtgeräte	HP 2648A
	VT-55
Drucker	HP 2671G
	LA 36

A.8 LITERATUR

/1/ W.Meissner und R.Ochsenfeld: Naturwiss. 21, 787(1933)

/2/ R.P.Huebener: Magnetic Structures in Superconductors
Springer Verlag, Berlin (1979)

/3/ W.Buckel: Supraleitung
Physik-Verlag, Weinheim (1977)

/4/ K.P.Selig: Dissertation, Tübingen (1979)

/5/ R.P.Huebener und R.T.Kampwirth,
Proc. 1972 Applied Supercond. Conf.,
Hrsg. H.M.Long,W.F.Gauster (IEEE,New York 1972)

/6/ D.E.Chimenti, H.L.Watson und R.P.Huebener,
J. of Low Temp. Phys. 23, 303(1976)

/7/ D.E.Chimenti und R.P.Huebener,
Solid State Comun. 21, 467(1977)

/8/ D.E.Chimenti und J.R.Clem, Phil. Mag. 38,635(1978)

/9/ R.P.Huebener, R.-T.Kampwirth and J.R.Clem,
J.Low Temp. Phys. 6,275(1972)

/10/ W.Buck, J.Parisi und B.Mühlemeier,
J.Low Temp. Phys. 55,51(1984)

/11/ W.Buck, J.Parisi und B.Mühlemeier,
Proc. 17th Intern. Conf. Low Temp. Phys.,
Karlsruhe,1984
Hrsg. U.Eckern, A.Schmid, W.Weber und H.Wühl,
(North Holland, Amsterdam,1984)S.581

/12/ W.Buck, J.Parisi und B.Mühlemeier, wird veroeffentlicht

/13/ H.Seifert: Dissertation, Tübingen (1980)

/14/ J.R.Clem, J. Phys. 39,C6-619(1978)

/15/ J.R.Clem, J. Low Temp. Phys. 42,363(1981)

/16/ J.Parisi, W.Buck, B.Mühlemeier und R.P.Huebener,
Phys. Lett. 79A,204(1980)

/17/ D.Ziessow: On-Line Rechner in der Chemie
Walter de Gruyter, Berlin 1973

/18/ J.Parisi, Diplomarbeit, Universität Tübingen (1979)
unveroeffentlicht

/19/ G.M.Hieftje: Anal. Chem. 44,175(1972)

/20/ DIGITAL, Processorhandbook pdp 11/04/24/34a/44/70
Digital Equipment Corporation, 1981

/21/ K.Penner, Diplomarbeit, Universität Tübingen (1985)
K.Penner, J.Parisi, B.Mühlemeier und R.P.Hübener
J. Low Temp. Phys. 62,177(1986)
/22/ B.Stütz, Diplomarbeit, Universität Tübingen (1979)
/23/ B.Mühlemeier, Zulassungarbeit zum Staatsexamen,
Universität Tübingen, (1978)
/24/ R.K.Elsly, Accurate Ultrasonic Measurements with
the BIOMATION#8100 Transientrecorder
in Proceedings of Symposium on
Ultrasonic Material Characterisation (NBS,1978)
/25/ M.Faris, Appl. Phys. Lett. 36,1005(1980)
D.B.Tuckerman, Appl. Phys. Lett. 36,1008(1980)
A.Matsuda und S.Uehara, Appl. Phys. Lett. 41,770(1982)
H.Akoh,S.Sakai,A.Yagi und H.Hayakawa
Jpn. J. Appl. Phys. 22,L435(1983)
A.Matsuda und T.Kawakami, Phys. Rew. Lett. 51,694(1983)
S.Sakai,H.Akoh und H.Hayakawa,
Jpn. J. Appl. Phys. 22,L479(1983)
/26/ J.Parisi, Rep. Prog. Phys. 48, 709(1985)
/27/ Model 8100 Waveform Recorder,
Operating and Service Manual (1978)
/28/ CAMAC Instruction Manual for Input/Output Register 9066
Nuclear Enterprises Limited
/29/ J.Parisi, Thesis, University of Tübingen (1982)
J.Parisi,R.P.Huebener, and B.Mühlemeier,
J. Low Temp. Phys. 51,655(1983)
R.Danner, to be published
J.Bosch, Diplomarbeit, Universität Tübingen (1982)
/30/ J.Parisi, B.Mühlemeier, R.P.Huebener und W.Buck,
J. Low Temp. Phys. 60,45(1985)
/31/ A.M.McLeod und A.R.Long,
J. Phys. E: Sci. Instrum. 15,1231(1982)
/32/ B.Mühlemeier,J.Parisi und W.Buck,
J. Phys E: Sci. Instrum.15,78(1984)
/33/ V.L.Newhouse: Applied Superconductivity,
Wiley,New York(1984)
/34/ M.Koyanagi, private Mitteilung (1984)
/35/ J.Parisi, private Mitteilung (1984)

/36/ Meinke,Gundlach:
Taschenbuch der Hochfrequenztechnik,
Springerverlag 1968

Lebenslauf

Persönliche Daten:

Name

Mühlemeier, Bernhard Josef

geboren

15.08.1950 in Brückenau, Ortsteil Römershag

Familienstand

verheiratet seit 27.07.1972, 2 Kinder

Ausbildung:

Abitur

Juli 1971 am Neusprachlichen Gymnasium
Bad Neustadt/Saale (Bayern)

Studium

Oktober 1972 - Februar 1978
Physik/Mathematik
Universität Tübingen
Abschluß mit Staatsexamen

Referendariat

August 1978 - Januar 1980
Seminar für Erziehung und Didaktik, Tübingen
Abschluß mit 2. Staatsexamen

Arbeitsstellen:

Erziehungshelfer

Sophienpflege Tübingen,
Oktober 1971 - Oktober 1972

Wiss. Hilfskraft

ZDV Tübingen und Physikalisches Institut Tübingen,
verschiedene Verträge während des Studiums
(Programmierung, Praktikumsbetreuung)

Systemprogrammierer

3/8-Stelle, Fa. GDV Tübingen
Februar 1980 - Dezember 1980

Wiss. Angestellter

1/2-Stelle, Universität Tübingen,
Lehrstuhl für Experimentalphysik II
Februar 1980 - Dezember 1984

Abteilungsleiter

1/2-Stelle, Fa. Xeltec, Tübingen
seit Dezember 1984

Hausmann

1/2-tags
seit Januar 1981

Dissertation:

Februar 1980 - Dezember 1984 über
"Zeitliche Struktur der Spannung beim strom-
induzierten Widerstand von Typ-I Supraleitern"
bei Herrn Prof. Dr. R.P.Hübener
am Lehrstuhl fuer Experimentalphysik II des
Physikalischen Instituts der Universität Tübingen

Akademische Lehrer:

M.Baumann, G.Betsch, Brauchle, W.Buck, U.Felgner, K.H.Gaukler, F.Gönnenwein, W.Hartmann, D.Höhn, R.P.Hübener, H.Krüger, G.Mack, G.Mertens, G.Möllenstedt, M.Möricke, R.Mühleisen, H.Pfister, F.Rex, R.Scheerer, E.Schmid, A.Schönhage, G.Schubring, G.Staudt, F.Wahl, H.Wielandt, H.Wittern, A.Wolf, K.Zeller u.a..